



Réseaux corporels sans fil en ondes millimétriques : antenne, propagation et interaction avec le corps

Caroles Leduc

► To cite this version:

Caroles Leduc. Réseaux corporels sans fil en ondes millimétriques : antenne, propagation et interaction avec le corps. Traitement du signal et de l'image [eess.SP]. Université de Rennes, 2015. Français. NNT : 2015REN1S084 . tel-01293760

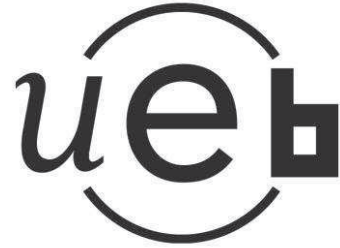
HAL Id: tel-01293760

<https://theses.hal.science/tel-01293760>

Submitted on 25 Mar 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



THÈSE / UNIVERSITÉ DE RENNES 1
sous le sceau de l'Université Européenne de Bretagne

pour le grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE RENNES 1
Mention : Traitement du Signal et Télécommunications
Ecole doctorale MATISSE

présentée par
Carole Leduc

Préparée à l'unité de recherche IETR - UMR 6164
Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes
ISTIC – UFR Informatique Electronique

**Réseaux corporels
sans fil en ondes
millimétriques :
antenne, propagation
et interaction avec le
corps**

**Soutenance prévue à Rennes
le 7 décembre 2015**

devant le jury composé de :

Philippe LEVEQUE

Directeur de recherche, Xlim, Université de
Limoges, Limoges / *rapporteur*

Katia GRENIER

Chargée de recherche CNRS, LAAS, Toulouse /
rapporteur

Christian PERSON

Professeur, Lab-STICC, Télécom Bretagne, Brest /
examineur

Julien SARRAZIN

Maître de conférences, L2E, Université Pierre et
Marie Curie, Paris / *examineur*

Maxim ZHADOBOV

Chargé de recherche CNRS, IETR, Université de
Rennes 1, Rennes / *co-encadrant de thèse*

Ronan SAULEAU

Professeur, IETR, Université de Rennes 1, Rennes /
directeur de thèse

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier Mme Katia GRENIER et M Philippe LEVEQUE d'avoir accepté de rapporter ce manuscrit de thèse. Merci également à M Christian PERSON et M Julien SARRAZIN pour leur présence en temps qu'examinateurs.

Je remercie bien évidemment M Ronan SAULEAU, mon directeur de thèse, pour m'avoir accordé sa confiance et donné l'opportunité pendant ces trois années de thèse de travailler sur un sujet de recherche intéressant et innovant. Merci pour son suivi et ses conseils constructifs qui m'ont permis de surmonter les difficultés rencontrées au cours de mes travaux.

Je souhaite aussi remercier M Maxim ZHADOBOV, pour son encadrement au quotidien, pour ses suggestions avisées, pour sa disponibilité et pour les nombreuses discussions tenues concernant mes travaux. Merci pour ses encouragements pendant ses trois années.

Je remercie également les mécaniciens du pôle prototypage du laboratoire, pour les différentes réalisations demandées durant cette thèse, ainsi que M Laurent LE COQ pour ses explications et ses conseils au cours des campagnes de mesure. Merci aussi aux secrétaires Martine et Noëlle pour leur aide au quotidien. Sans oublier M Nacer CHAHAT, qui m'a précédé sur l'étude des réseaux corporels sans fil en bande millimétriques, et que je remercie pour le partage de ses connaissances sur le sujet.

Les années au sein du laboratoire sont passées rapidement et dans une bonne ambiance grâce à la sympathique équipe de doctorants, post-doctorants et personnels permanents de l'IETR, merci à vous tous. Un merci particulier à Oumar, Evgueni et Gilles pour les bons moments partagés dans le même bureau et pour leurs encouragements ! Merci également à Narcisse, Adrien, Yaakoub, Anthony, Denis, Mathilde, My-Linh, Mohsen, Mohamad, Francesco, Jonathan, Lilia, Taufik, Antoine.

Et enfin, pour ma famille, merci à mes parents, et à ma sœur pour leur soutien sans faille pendant ses longues d'étude. Merci aussi à Camille pour son soutien et sa présence au quotidien pendant ces trois années de thèse et plus particulièrement au cours des derniers mois.

Table des matières

Chapitre I. Introduction	1
1. Réseaux corporels sans fil en bande millimétrique	3
1.1. Descriptif des communications sans fil centrées sur le corps.....	3
1.2. Intérêt de la bande millimétrique pour les réseaux corporels	4
1.3. Exemples d'applications BAN à 60 GHz.....	5
2. Modèles du corps humain à 60 GHz	8
2.1. Caractéristiques de l'absorption électromagnétique dans le corps humain	8
2.2. Propriétés électromagnétiques de la peau humaine à 60 GHz.....	9
2.3. Fantômes expérimentaux du corps humain	11
3. Evaluation de l'exposition dans le corps humain en bande millimétrique.....	15
3.1. Grandeurs dosimétriques.....	15
3.2. Evaluations dosimétriques expérimentales.....	16
3.3. Recommandations d'exposition du corps humain	19
4. Problématique et contributions des travaux de thèse.....	23
5. Organisation du manuscrit.....	25
6. Références	27
 Chapitre II. Impact de la méthode d'alimentation d'antennes imprimées sur le couplage antenne/corps à 60 GHz : évaluation et quantification numérique	 31
1. Introduction	33
1.1. Antennes pour les communications centrées sur le corps à 60 GHz	33
1.2. Réduction du couplage corps/antenne	36
1.3. Objectif.....	41
2. Conception et optimisation de réseaux d'antennes imprimées off-body à 60 GHz	43
2.1. Théorie des antennes patch micro-ruban	43
2.2. Matériels et méthodes.....	46
3. Comparaison des méthodes d'alimentation de réseaux d'antennes imprimées 60 GHz.....	49
3.1. Structures et géométries des réseaux d'antennes	49
3.2. Adaptation sur la bande 60 GHz	56
3.3. Performances en rayonnement à 60 GHz	60
3.4. Analyse dosimétrique à 60 GHz de l'exposition du fantôme équivalent de la peau	67
4. Conclusions	72
5. Références	74

Chapitre III. Réalisation et mesure des réseaux d'antennes <i>off-body</i> à 60 GHz	79
1. Introduction.....	81
2. Description de la réalisation des prototypes des réseaux d'antennes	82
2.1. Contraintes de fabrication.....	82
2.2. Séquences de fabrication des prototypes	84
2.3. Tolérances et limites technologiques.....	89
3. Prototypes de réseaux d'antennes <i>off-body</i>	92
3.1. Détails des prototypes réalisés.....	92
3.2. Répartition et positionnement des prototypes sur les planches	93
3.3. Estimation des précisions de gravure et d'alignement	95
4. Performances expérimentales des prototypes	98
4.1. Matériels et méthodes.....	98
4.2. Adaptation des prototypes sur la bande 55-65 GHz	100
4.3. Résultats en rayonnement.....	104
4.4. Gain et efficacité du rayonnement des prototypes.....	112
5. Conclusion	117
6. Références.....	119
 Chapitre IV. Modélisation analytique du comportement thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz.....	 121
1. Introduction.....	123
1.1. Les modèles thermiques du corps humain.....	123
1.2. Problématique.....	128
2. Notions de base en thermodynamique	130
2.1. Caractéristiques thermiques d'un matériau solide.....	130
2.2. Modes de transfert de chaleur.....	132
2.3. Conditions aux limites.....	134
3. Caractéristiques thermo-physiques du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz	137
3.1. Capacité thermique du fantôme.....	137
3.2. Conductivité thermique du fantôme	139
4. Expression analytique des transferts de chaleur dans un fantôme exposé à une onde électromagnétique	142
4.1. Modèle d'exposition considéré	142
4.2. Equation de transfert de chaleur	142
4.3. Conditions spécifiques au modèle	143

5.	Résolution de l'équation de transfert de chaleur	145
5.1.	Solution en régime établi.....	145
5.2.	Solution en régime stationnaire sans terme source.....	146
6.	Etude du comportement de la solution analytique $T(z,t)$	148
6.1.	Convergence et précision de $T(z,t)$	148
6.2.	Analyse paramétrique de $T(z,t)$	149
7.	Conclusion.....	153
8.	Références	154
 Chapitre V. Validation numérique et expérimentale du modèle thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz		
		157
1.	Introduction	159
2.	Modèle numérique thermique du fantôme à épaisseur finie.....	160
2.1.	Description du modèle numérique.....	160
2.2.	Equivalences entre les paramètres numériques et analytiques	161
2.3.	Comparaison avec le modèle thermique analytique du fantôme	163
3.	Validation expérimentale.....	166
3.1.	Matériel et protocole de mesure par thermométrie infrarouge	166
3.2.	Analyse numérique des incertitudes des paramètres du modèle expérimental.....	167
3.3.	Validation expérimentale du comportement thermique du fantôme	175
4.	Comparaison au modèle numérique multicouche de tissus	178
4.1.	Structure et particularités du modèle de tissus multicouches	178
4.2.	Modèle numérique multicouche du corps humain exposé	179
4.3.	Ecart avec le modèle homogène du fantôme de la peau humaine	180
5.	Conclusion.....	185
6.	Références	186
 Chapitre VI. Analyse thermique du couplage antennes/corps à 60 GHz.....		
		187
1.	Introduction	189
2.	Antennes sur le fantôme : évaluation numérique	190
2.1.	Modèles.....	190
2.2.	Impact de la présence du connecteur sur le DAS	192
2.3.	Distinction entre les sources d'échauffement du fantôme équivalent.....	197
3.	Validation expérimentale.....	203
3.1.	Mesures à l'aide de la caméra infrarouge	203

3.2.	Résultats de mesures thermiques	205
4.	Analyse dosimétrique et thermique des niveaux d'exposition des réseaux d'antennes	209
4.1.	Lien avec les normes limites d'exposition en bande millimétrique	209
4.2.	Comparaison entre les tendances électromagnétiques et thermiques	210
4.3.	Analyse et interprétation des résultats thermiques	211
5.	Conclusion	213
6.	Références.....	214
	Conclusion et perspectives	215
	Conclusion générale.....	215
	Perspectives de travail	217
	Annexe A : Composition et procédure de fabrication du fantôme équivalent de la peau à 60 GHz	219
	Annexe B : Dimensions des réseaux d'antennes <i>off-body</i> optimisées et mesurées.....	223
	Annexe C : Adaptation et performances en rayonnement numérique des réseaux d'antennes <i>off-body</i> 60 GHz sans connecteur	231
	Annexe D : Méthode de résolution d'une équation différentielle du second ordre inhomogène	235
	Annexe E : Système de résolution permettant d'établir l'expression de la solution $v(z)$ spécifique au modèle.....	237
	Annexe F : Expressions analytiques des solutions $I(t)$ et $Z(z)$	239

Chapitre I. Introduction

Sommaire

1.	Réseaux corporels sans fil en bande millimétrique	3
1.1.	Descriptif des communications sans fil centrées sur le corps.....	3
1.2.	Intérêt de la bande millimétrique pour les réseaux corporels	4
1.3.	Exemples d'applications BAN à 60 GHz.....	5
2.	Modèles du corps humain à 60 GHz	8
2.1.	Caractéristiques de l'absorption électromagnétique dans le corps humain.....	8
2.2.	Propriétés électromagnétiques de la peau humaine à 60 GHz.....	9
2.3.	Fantômes expérimentaux du corps humain	11
3.	Evaluation de l'exposition dans le corps humain en bande millimétrique	15
3.1.	Grandeurs dosimétriques	15
3.2.	Evaluations dosimétriques expérimentales.....	16
3.3.	Recommandations d'exposition du corps humain	19
4.	Problématique et contributions des travaux de thèse.....	23
5.	Organisation du manuscrit.....	25
6.	Références	27

1. Réseaux corporels sans fil en bande millimétrique

1.1. Descriptif des communications sans fil centrées sur le corps

Le terme BAN pour «Body Area Network» est un acronyme couramment utilisé pour désigner un réseau de communication sans fils composé d'un ensemble d'éléments rayonnants placés sur et à proximité du corps humain. La thématique des communications centrées sur le corps humain suscite depuis plusieurs années déjà un fort intérêt de la communauté scientifique internationale. En effet, de nombreux travaux ont d'ores et déjà été menés sur la conception d'antennes BAN, la caractérisation de la propagation sur le corps, mais aussi la compatibilité électromagnétique ou encore les interactions corps/antenne [1]. Les ressources et l'efficacité énergétique des dispositifs ou encore les architectures et algorithmes des systèmes de communications sur le corps ont aussi fait l'objet d'études [2].

Les dispositifs BAN comme les antennes ou bien les capteurs, possèdent la capacité d'échanger des informations entre eux, mais aussi de communiquer avec des dispositifs implantés dans le corps ou bien situés à proximité du corps. Plusieurs types de liaisons sont donc possibles (Figure I.1), elles sont classées suivant trois catégories [1] :

- (1) les liaisons *in-body* qui permettent à un dispositif implanté dans les tissus de communiquer avec un autre placé sur le corps ou bien à proximité ;
- (2) les liaisons *on-body* qui caractérisent les communications entre des dispositifs placés en surface du corps ;
- (3) les liaisons *off-body* distinguent les communications entre un dispositif placé sur le corps et un dispositif situé dans un rayon de quelques mètres (< 10 m) du corps humain, comme par exemple une station de base, un ordinateur ou un autre utilisateur.

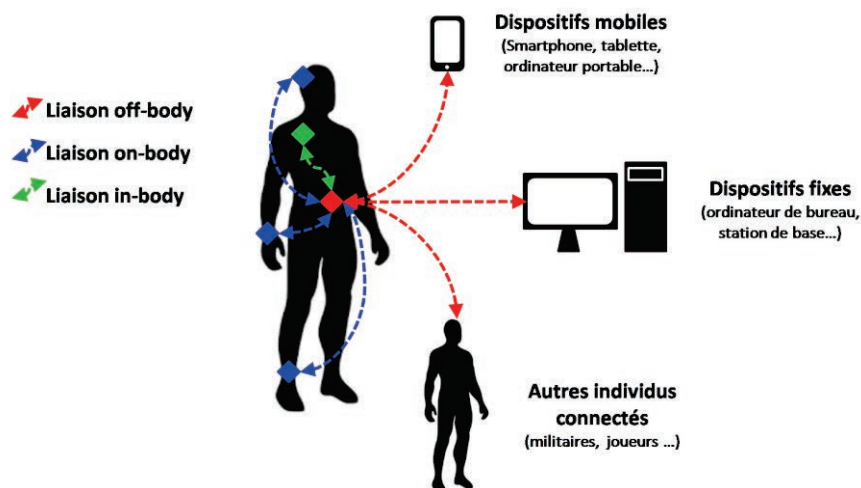


Figure I.1 - Illustration des liaisons possibles entre dispositifs BAN.

Les dispositifs BAN doivent être facilement intégrables sur le corps humain, c'est-à-dire légers, de petites tailles et discrets. D'autres critères peuvent être requis dans certains domaines d'application [3]. En effet, les domaines d'application des BAN sont très variés : cela va du domaine médical au domaine militaire en passant par les domaines du sport, du multimédia, des communications mobiles, du spatial ou encore de l'identification/sécurité (Figure I.2).

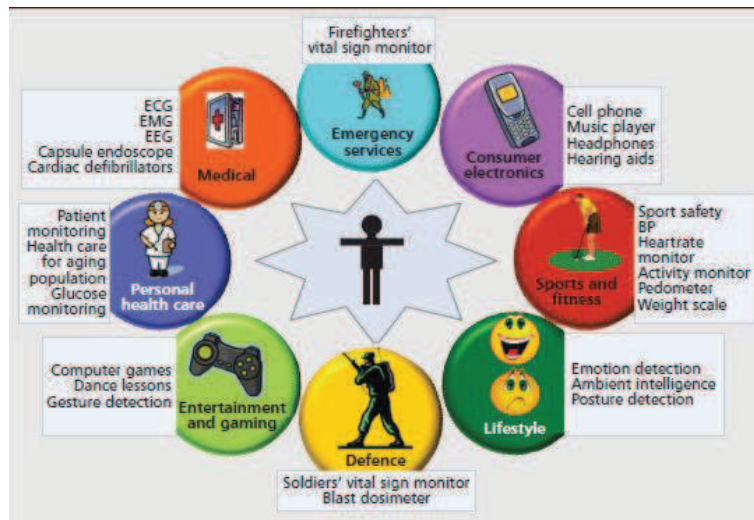


Figure I.2 : Domaines d'application potentiels des réseaux de communication BAN [3].

1.2. Intérêt de la bande millimétrique pour les réseaux corporels

Les progrès technologiques de ces dernières années en bande millimétrique ont favorisé l'émergence de nombreux systèmes pour les communications sans fils à courte portée, tels que les systèmes de communication indoor (Figure I.3) qui permettent de connecter différents objets multimédia à l'échelle d'une pièce (TV, ordinateur, tablette, etc). Cette bande de fréquence est aussi fortement envisagée pour le développement de la future génération des réseaux de communication mobile ; de nombreux travaux sont d'ailleurs en cours en vu de son déploiement à l'horizon 2020 [4].



Figure I.3 - Exemple de réseau indoor à 60 GHz [5].

Récemment, la bande millimétrique a aussi été identifiée comme potentiellement prometteuse pour les communications sans fil sur le corps humain, et plus particulièrement la bande de fréquence entourant 60 GHz [6]. En effet, cette bande présente plusieurs avantages pour les BAN en comparaison aux bandes de fréquence plus basses. Tout d'abord, et c'est aussi vrai pour tout le spectre millimétrique, les longueurs d'onde dans le vide λ_0 sont faibles (seulement 5 mm à 60 GHz). Cette caractéristique permet de développer des antennes avec des dimensions de l'ordre du centimètre voire du millimètre, facilitant ainsi leur intégration sur le corps. Le second avantage est le pic d'absorption atmosphérique à 60 GHz, de l'ordre de 16 dB/km, qui permet de réduire les risques d'interférences avec les réseaux avoisinants [7]. Cet isolement peut se révéler être un critère important pour certaines applications, comme dans le domaine militaire par exemple. Le troisième avantage est que la bande des 60 GHz est libre de droit et large de plusieurs GHz (57-64 GHz en Amérique du Nord, 57-66 GHz en Europe, 59-66 GHz au Japon etc). Cette dernière

caractéristique permet d'atteindre des débits de transfert de données de plusieurs Gbit/s [8], permettant de répondre aux besoins croissants de vitesse de transfert de données.

1.3. Exemples d'applications BAN à 60 GHz

D'ores et déjà plusieurs applications pouvant s'inscrire dans la thématique des réseaux corporels sans fil en bande millimétrique ont vu le jour. Dans les paragraphes qui suivent, plusieurs projets ou concepts BAN dans la bande des 60 GHz sont présentés pour des applications variées dans plusieurs grands domaines tel que le médical, le militaire ou encore le multimédia.

- **Projet MiWaves : Réseaux sans fil hétérogènes à cellules millimétriques pour la 5^{ème} génération de communication mobile**

MiWaves [4] est un projet collaboratif européen mené par des industriels et des universitaires dont l'objectif principal est d'étudier les architectures et les technologies pour les réseaux de communication mobile sans fils large bande permettant de connecter les utilisateurs d'objets mobiles à leurs espaces de données et à d'autres objets. Ce projet doit mettre en avant l'intérêt des technologies en bande millimétrique pour la future génération de communication mobile en démontrant que ces technologies permettent un débit de plusieurs Gbit/s suffisant pour supporter la croissance du trafic de données des dispositifs mobiles actuellement sous estimée dans le réseau 4G. Les aspects dosimétriques relatifs aux expositions du corps humain en bande millimétrique sont aussi abordés dans le cadre de ce projet, à travers un état de l'art principalement centré sur les expositions en bande V (60 GHz) et en bande E (70 GHz / 80 GHz / 90 GHz). Cet état de l'art résume et analyse les bases des recommandations ou limites d'exposition en vigueur actuellement.

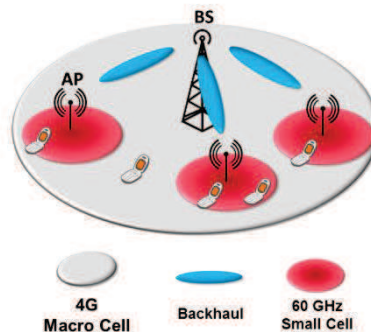


Figure I.4 - Illustration des principes d'accès au réseau mobile hétérogène 5G [4].

- **Projet Soli de Google: Capteur de mouvement fonctionnant à 60 GHz**

Le projet Soli de Google vise à développer un capteur capable de détecter les mouvements de la main ou bien des doigts, afin de pouvoir interagir avec des objets connectés utilisés sur le corps (Figure I.5). Les applications cibles de cette puce visent à contrôler les petits écrans d'objet comme les montres connectées.

Ce capteur est une puce radar miniature de seulement 9 mm², fonctionnant à 60 GHz [9]. Cette puce peut émettre, et traiter le signal retour en prenant en compte la gestuelle et les mouvements de la main avec une précision très élevée de l'ordre du millimètre. Des algorithmes permettent ensuite d'interpréter les mouvements de la main comme une commande précise sur l'écran de l'objet, comme par exemple l'agrandissement d'une image. De plus, cette puce est capable de détecter des mouvements dans plusieurs plans.

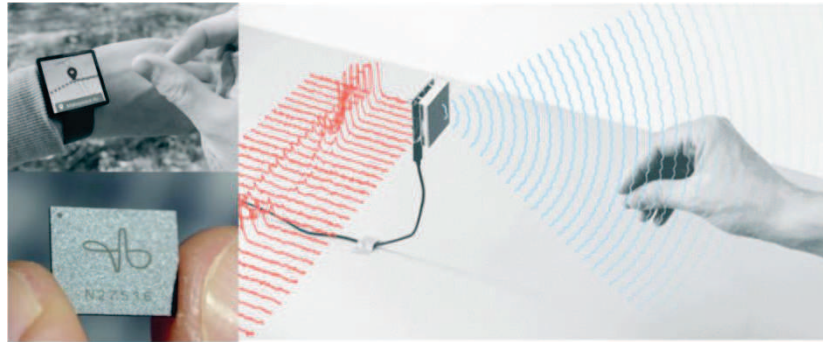


Figure I.5 - Puce radar Soli de Google [9].

▪ Concept Manet (Mobil ad-hoc network) pour les communications inter-soldats à 60 GHz

Dans [10], la faisabilité d'un réseau de communication inter-soldats à courte portée à 60 GHz répondant aux exigences de communication sur les théâtres d'opérations militaires est présentée. La faisabilité des liaisons entre les différents soldats d'une troupe au sol est analysée.

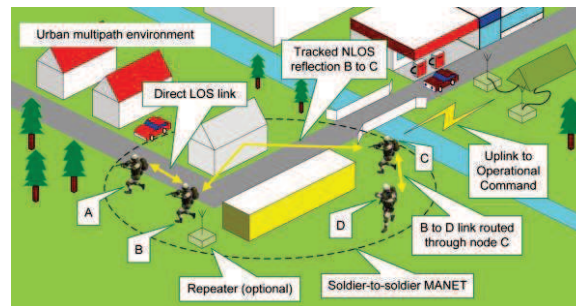


Figure I.6 - Concept de communication Manet appliqué aux liaisons inter-soldats à 60 GHz [10].

L'intérêt des communications à 60 GHz entre des éléments rayonnants placés à différentes positions sur un soldat et son équipement est analysé dans [11], par notamment la caractérisation de l'affaiblissement du signal entre les éléments dans le cas de plusieurs postures du soldat.

▪ Concepts E-Health pour la télémédecine à 60 GHz

Bien qu'il n'existe pas actuellement à notre connaissance de système de communication E-Health à 60 GHz, plusieurs scénarios d'applications biomédicales sont imaginés dans [12] pour mettre en avant ce type d'applications en bande millimétrique, comme par exemple, un scénario de monitoring de patient à distance. Dans ce scénario, des liaisons de communications 60 GHz et 5G sont utilisées pour surveiller le patient via une caméra haute résolution et permettre la connexion à la base de données du système E-Health. La transmission des données de la caméra vers un dispositif multi-interface type smartphone est faite via une liaison 60 GHz, puis le smartphone redirige ensuite l'information vers le cloud E-Health par liaison mobile 5G.

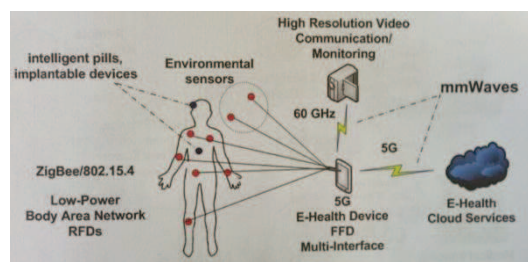


Figure I.7 - Schématisation du scénario E-Health 60 GHz / 5G [12].

- **GlucoWISE™ : Moniteur de glucose non-invasif à 65 GHz**

GlucoWISE™ [13] est une application biomédicale. C'est un capteur de glucose non invasif qui pourrait permettre de déterminer avec précision le taux de glucose dans le sang en quelques secondes. Le dispositif se positionne entre le pouce et l'index (Figure I.8) ou bien sur le lobe de l'oreille. Le taux de glucose est obtenu par une technique de mesure sans douleur (le dispositif presse délicatement la peau), basée sur la transmission d'un signal haute fréquence autour de 65 GHz à travers l'épaisseur de peau qui est suffisamment fine dans les parties du corps choisies pour permettre au signal de traverser les tissus et d'être reçu par un capteur. Ce capteur intègre des films nano-composites permettant de collecter et d'analyser les caractéristiques du sang dans les tissus traversés. Les informations collectées sont ensuite envoyées par communication bluetooth vers un appareil mobile tel qu'un smartphone, où une application permettant la lecture et l'affichage du taux de glucose a été préalablement installée.



Figure I.8 - Illustration de moniteur de glucose non invasif GlucoWISE™ [13].

2. Modèles du corps humain à 60 GHz

2.1. Caractéristiques de l'absorption électromagnétique dans le corps humain

En bande millimétrique, les champs électromagnétiques (EM) sont absorbés par les couches superficielles du corps humain. A 60 GHz, les principales cibles biologiques sont la peau et les yeux [14][15].

Récemment, un modèle numérique des transferts de chaleur dans des yeux de lapin exposés à 60 GHz a été proposé dans [16]. Avec ce modèle, une température maximum de 45,8°C est obtenue numériquement pour une exposition à une densité de puissance incidente 475 mW/cm², montrant un très bon accord avec les résultats expérimentaux de [17]. Cependant les yeux ne représentent qu'une faible proportion de la surface totale du corps qui risque d'être exposée contrairement à la peau. En effet, la peau représente plus de 95% de la surface du corps, elle est en moyenne composée à 65,3% d'eau, à 24,6% de protéine et à 9,4% de lipides [18]. Elle peut être considérée comme une structure multicouches (Figure I.9) composée de l'épiderme dont la surface est appelée stratum corneum pour laquelle la concentration en eau est faible (15% à 40%), et du derme (Figure I.9). Les épaisseurs de couche de ces tissus varient beaucoup d'une partie du corps à l'autre. Alekseev *et al.* comparent dans [19] les caractéristiques dosimétriques telles que le coefficient de réflexion, la densité de puissance, la profondeur de pénétration où encore le DAS entre des modèles homogènes et multicouches de la peau en bande millimétrique. Les résultats montrent que l'atténuation de la puissance est principalement due aux couches d'épiderme et de derme qui contiennent beaucoup d'eau, la couche de tissu adipeux ayant un faible impact. Notons que le stratum corneum, qui correspond à la couche de cellules mortes en surface de l'épiderme, a un impact important s'il est épais comme dans la paume des mains, ce qui nécessite alors de considérer un modèle multicouche de la peau. En revanche, un modèle homogène est suffisant pour modéliser électromagnétiquement la peau dans les zones du corps où l'épaisseur de stratum corneum est faible [20].

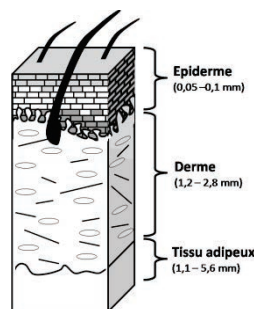


Figure I.9 - Représentation schématique de la structure de la peau humaine.

2.2. Propriétés électromagnétiques de la peau humaine à 60 GHz

2.2.1. Modèles électromagnétiques

La connaissance des propriétés électromagnétiques de la peau est essentielle pour modéliser son comportement, comme les réflexions aux interfaces ou bien l'absorption. Ces propriétés sont caractérisées à une fréquence donnée par la permittivité complexe :

$$\varepsilon^* = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

où

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (2)$$

avec σ la conductivité électrique (S/m), f la fréquence (Hz) et ε_0 la permittivité dans le vide (8.85×10^{-12} F/m).

La permittivité de la peau peut aussi être décrite par l'équation de Debye [15] avec un seul temps de relaxation $\tau(s)$ égale à celui de l'eau :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + j\omega\tau} + \frac{\sigma_s}{j\omega\varepsilon_0} \quad (3)$$

où ε_∞ est la permittivité optique, ε_s est la permittivité à $\omega\tau \ll 1$, $\omega = 2\pi f$ et σ_s est la conductivité ionique de la peau (S/m). Les mesures de permittivité complexe de la peau réalisées par Gabriel *et al* [21] peuvent être approchées avec un modèle de Debye où les paramètres du modèle sont respectivement égaux à $\varepsilon_\infty = 4$, $\varepsilon_s = 42$, $\tau = 6,9 \times 10^{-12}$ s et $\sigma_s = 1,4$ S/m.

Il est aussi possible d'utiliser l'équation de Cole-Cole [15] pour modéliser le comportement de la permittivité de la peau :

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} + \frac{\sigma_s}{j\omega\varepsilon_0} \quad (4)$$

où α désigne la propagation dans le temps de relaxation. Les mesures de permittivité complexe effectuées par Chahat *et al.* [22] sur la peau de l'avant-bras peuvent être modélisées avec ce type de modèle où $\varepsilon_\infty = 8,35$, $\varepsilon_s = 28,85$, $\tau = 7,13 \times 10^{-12}$ s, $\sigma_s = 0,5$ S/m et $\alpha = 0,064$.

En considérant que la peau est composée en majorité d'eau, et que le comportement de sa permittivité complexe est principalement régi par ce constituant, il est aussi possible d'estimer la permittivité complexe de la peau à l'aide du modèle de permittivité complexe de l'eau proposée par Ellison dans [23].

Contrairement aux bandes de fréquence inférieures à 20 GHz, les données des permittivités complexes des tissus en bande millimétrique sont moins nombreuses en raison notamment des difficultés de mesure diélectriques à ces fréquences [15][24]. Cependant, avec les progrès techniques récents, de nouveaux moyens et des nouvelles méthodes de mesure ont été développés [26].

Les résultats des mesures de permittivité complexe de la peau sont fortement liés aux techniques de mesure et aux caractéristiques de la peau mesurée (température, localisation sur le corps, etc.) [14]. Les données disponibles concernant la permittivité complexe de la peau à 60 GHz sont synthétisées dans le Tableau I.1. Pour obtenir la permittivité de la peau à 60 GHz, Gandhi et Razi [27] ainsi que Gabriel *et al.* [21] ont extrapolé des résultats de mesures effectuées

respectivement à 23 GHz sur de la peau de lapin, et entre 10 Hz et 20 GHz sur la peau humaine *in vivo*. Les résultats des autres modèles sont obtenus par mesure *in vitro* comme pour le modèle d'Alabaster *et al.* [28] ou bien par mesure *in vivo* comme dans le cas des modèles proposés par Alekseev *et al.* [20] et Chahat *et al.* [24][22] pour différentes localisations sur le corps (paume ou bien avant-bras).

2.2.2. Réflexion à l'interface air/peau

En bande millimétrique le corps humain est électriquement grand (λ_{peau} est compris entre 0.35 mm et 3.5 mm), permettant de considérer la peau humaine illuminée par une onde plane incidente comme une surface plate, homogène et infinie [15]. La permittivité complexe de la peau impacte le coefficient de réflexion en puissance (R) à l'interface air/peau, et cela quel que soit la polarisation de l'onde incidente. Le Tableau I.1 résume les valeurs du coefficient de réflexion en puissance pour chacun des modèles diélectriques pour une incidence normale. Dans [14] et [15], l'impact de l'angle d'incidence sur le coefficient de réflexion en puissance est comparé dans le cas de polarisations parallèles (le champ électrique est parallèle à la surface de la peau, mode transverse magnétique TM) et perpendiculaires (le champ électrique est perpendiculaire à la surface de la peau, mode transverse électrique TE) pour les différents modèles. Les résultats obtenus montrent que 30 à 40% de la puissance incidente est réfléchi à la surface de la peau pour une incidence normale et que des variations faibles de l'angle d'incidence peuvent entraîner des changements importants de la valeur du coefficient de réflexion en puissance.

2.2.3. Absorption dans la peau

L'énergie électromagnétique qui pénètre dans le corps humain diminue exponentiellement avec la profondeur. L'absorption à une fréquence donnée dans un tissu biologique, est caractérisée par la profondeur de pénétration ou profondeur de peau δ (m). Cette profondeur définit la distance à laquelle les champs électromagnétiques sont diminués d'un facteur $1/e$ par rapport au niveau à l'interface air/peau. Elle s'exprime analytiquement par l'expression suivante [29]:

$$\delta = \frac{1}{\omega \left[\frac{\mu_0 \mu \epsilon_0 \epsilon'}{2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{\omega \epsilon_0 \epsilon'} \right)^2} - 1 \right) \right]^{1/2}} \quad (5)$$

où μ est la perméabilité de la peau ($\mu=1$), et μ_0 la perméabilité du vide.

Les valeurs de la profondeur de pénétration pour chaque modèle électromagnétique de la peau humaine à 60 GHz sont fournies en Tableau I.1. On observe que, quel que soit le modèle considéré, δ est de l'ordre de 0,5 mm. L'absorption du rayonnement électromagnétique à 60 GHz se concentre donc dans les couches comme l'épiderme et le derme de la peau.

Tableau I.1 - Synthèse des modèles électromagnétiques de la peau humaine à 60 GHz [15][24].

Modèles	ϵ^*	σ (S/m)	T (°C)	Echantillon	R* (%)	Δ^{**} (mm)
Gandhi et Riazzi [27]	8,89-j13,15	43,9	37±0,5	In vitro	41,1	0,43
Gabriel <i>et al.</i> [21]	7,98-j10,90	36,4	37	In vivo	37,8	0,48
Alabaster <i>et al.</i> [28]	9,9-j9,0	30	23	In vitro	35,6	0,60
Alekseev <i>et al.</i> [20]	8,12-j11,13	37,1	32,5±0,3	In vivo/ avant-bras	38,2	0,47
Chahat <i>et al.</i> [24]	8,02-j10,5	35	32,5±0,5	In vivo/ avant-bras	37,1	0,49

* Coefficient de réflexion en puissance à la surface du corps

** Profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique dans le corps humain

2.3. Fantômes expérimentaux du corps humain

Les fantômes sont des modèles expérimentaux simulant les caractéristiques électromagnétiques des tissus biologiques. Ces fantômes peuvent être utilisés pour étudier la propagation sur le corps, ou bien pour évaluer les interactions corps/antenne, ou encore pour les études dosimétriques. Leur utilisation a l'avantage d'assurer aux mesures d'être reproductibles et bien contrôlées, contrairement aux mesures sur le corps humain où les structures et les propriétés des tissus changent d'un individu à l'autre, et même d'une partie du corps à une autre.

En raison de l'explosion du nombre d'objets rayonnants susceptibles d'être utilisés à proximité immédiate voire même en contact du corps (téléphones mobiles, BAN, etc.), les fantômes expérimentaux sont devenus des outils indispensables pour évaluer les niveaux d'exposition aux rayonnements électromagnétiques.

De nombreux fantômes ont été développés pour différentes bandes de fréquences, ils peuvent être classés en trois catégories de matériaux, à savoir *liquides*, *semi-solides* ou bien *solides* [1].

2.3.1. Fantômes liquides

Les fantômes liquides sont utilisés pour les études dosimétriques en dessous de 6 GHz [30]. C'est le premier type de fantôme à avoir été utilisé pour l'évaluation du débit d'absorption spécifique (DAS). Il permet de mesurer le champ électrique dans le liquide avec une sonde de petite taille, fournissant ainsi une cartographie 3-D détaillée des niveaux des champs électromagnétiques absorbés par les tissus.

Ce type de fantôme est composé d'un liquide homogène dont le principal constituant est l'eau, et dont les propriétés diélectriques sont optimisées pour que les valeurs de DAS mesurées à une fréquence donnée soient légèrement surestimées par rapport aux résultats dosimétriques obtenus à l'aide de modèles numériques. Les fantômes liquides peuvent être contenus dans des récipients en fibre de verre ayant une forme réaliste (Figure I.10). Pour les études dosimétriques en dessous de 3 GHz, l'épaisseur du contenant est de l'ordre de 2 mm, et les caractéristiques diélectriques sont inférieures à 5 pour la permittivité relative et 0,8 pour la tangente de perte [31].



Figure I.10 - Exemple de contenant pour fantômes liquide de type TORSO-X-V5.x pour les études dosimétriques de 300 MHz à 6 GHz [32].

Cependant, les fantômes liquides ne peuvent pas être utilisés en bande millimétrique, en raison de la présence de contenants dont l'épaisseur est supérieure à la profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique dans cette gamme de fréquences.

2.3.2. Fantômes semi-solides

Ce type de fantômes peut reproduire/modeler de façon très réaliste la géométrie d'une partie du corps humain telle que une main, un torse ou bien une tête comme le fantôme liquide. Il est composé en majorité d'eau, dans laquelle sont ajoutés des agents gélifiants et de viscosité tels que l'agar et le TX-151. La permittivité est ajustée via la concentration dans le mélange de poudre de polyéthylène et de chlorure de sodium, qui contrôlent respectivement la permittivité relative et la conductivité électrique. Ce type de fantôme permet de simuler les propriétés diélectriques des tissus à forte concentration en eau tels que la peau, les muscles, le cerveau, etc. Les utilisations de cette catégorie de fantômes sont variées ; études de propagation sur le corps humain, ou bien études des interactions corps/antenne, ou encore mesures dosimétriques par thermométrie infrarouge [24].

Le premier fantôme semi-solide a été développé pour simuler les propriétés diélectriques des tissus du corps humain riche en eau entre 200 MHz et 1,2 GHz tel que les muscles [33]. Il est composé à 77 % de solution saline (eau + chlorure de sodium 12 g/L), à 15% de poudre de polyéthylène et 8% d'un agent gélifiant. Depuis, d'autres fantômes semi-solides ont été développés pour diverses bandes de fréquence en microonde, comme par exemple dans [34] où des fantômes émulant les propriétés des muscles et du cerveau de 300 MHz à 2,5 GHz ont été élaborés pour les mesures de DAS. Ces fantômes sont toujours composés d'eau déionisée, d'agar, de poudre de polyéthylène, de chlorure de sodium, de TX-151 qui augmente la viscosité et d'azotate de sodium qui est un conservateur permettant d'accroître la durée de vie des fantômes. On trouve également dans la littérature des exemples de fantôme semi-solides multicouches, comme ceux présentés dans [35] et [36]. Ces fantômes sont utilisés pour caractériser expérimentalement les performances d'antennes implantables pour les communications in-body respectivement à 950 MHz et 2,5 GHz. Dans les deux cas, ce sont des modèles peau, graisse et muscle qui sont utilisés (Figure I.11a), dont les propriétés diélectriques mesurées pour les différentes couches sont en bon accord avec les valeurs cibles pour les tissus (déviations < 10%). Il est important de noter que les composants de la couche émulant la graisse sont différents de ceux du muscle ou de la peau. En effet, pour la graisse, le composant principal n'est plus l'eau déionisée mais le silicone à 62,5 %, et ce ne sont plus les concentrations de poudre de polyéthylène et le chlorure de sodium qui servent à ajuster les propriétés électromagnétiques, mais celle de la glycérine et de l'aluminium en poudre [35].

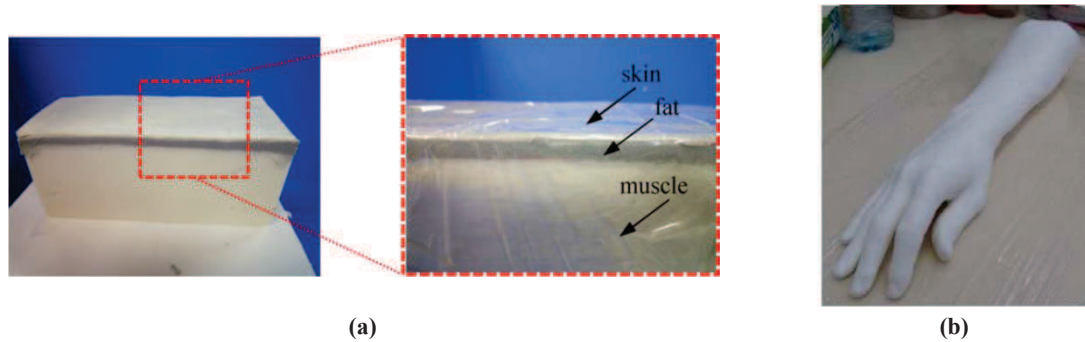


Figure I.11 - Fantômes semi-solides (a) multicouches [36] et (b) fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz représentant une main et un avant bras [24].

La majorité des fantômes semi-solides disponibles aujourd'hui reproduisent les propriétés électromagnétiques des tissus pour des fréquences en dessous de 10 GHz. A notre connaissance, les seuls fantômes couvrant certaines parties du spectre millimétrique sont ceux développés dans [24] et [37]. Dans [24], un fantôme émulant les propriétés diélectriques de la peau humaine sur la bande de fréquence 55-65 GHz avec une précision de $\pm 10\%$ est proposé non seulement pour la caractérisation d'antennes BAN (Figure I.11b), mais aussi pour l'étude de canal de propagation sur le corps, ou encore pour évaluer l'absorption électromagnétiques dans la peau via une approche thermique. Ses constituants sont semblables à ceux utilisés dans [34], à l'exception du chlorure de sodium qui est absent en raison de la faible contribution de la conductivité ionique dans les modèles diélectriques en bande millimétrique. Notons que les paramètres thermo-physiques de ce fantôme, utilisés dans l'étude dosimétrique par thermométrie infrarouge ont été estimés à partir des caractérisations thermiques réalisées dans [34] et des valeurs pour la peau [18].

L'avantage des fantômes semi-solides est leur faible complexité de fabrication ainsi que leur coût. En revanche, leur durée de vie est limitée en raison de pertes en eau au cours du temps (évaporation), lesquelles entraînent une dégradation des propriétés diélectriques.

2.3.3. Fantôme solide

Les fantômes solides (Figure I.12) peuvent être utilisés pour les mesures de DAS en surface du corps par thermographie [38] [39]. Contrairement aux fantômes liquides ou semi-solides dont les propriétés diélectriques se dégradent dans le temps en raison de l'évaporation de l'eau qu'ils contiennent, les fantômes solides (qui ne contiennent pas d'eau) présentent l'avantage d'être extrêmement stables dans le temps. En revanche, leur coût de fabrication est élevé et leur réalisation plus complexe, en raison de la nécessité d'utilisation d'équipements spécifiques et coûteux permettant d'atteindre des températures ($\sim 260^\circ$) et des pressions élevées. Ces fantômes ont une composition généralement basée sur la poudre céramique [39], et/ou le carbone sous forme de poudre ou de fibre [38], lesquels sont incorporés à une matrice en silicone, afin d'ajuster les propriétés diélectriques de cette dernière pour les faire tendre vers celles des tissus sur une bande de fréquence donnée. On trouve plusieurs de ces fantômes dans la littérature, dont certains couvrent de larges bandes de fréquence comme dans [40], où le fantôme reproduit les propriétés diélectriques des tissus de la main jusqu'à 6 GHz.

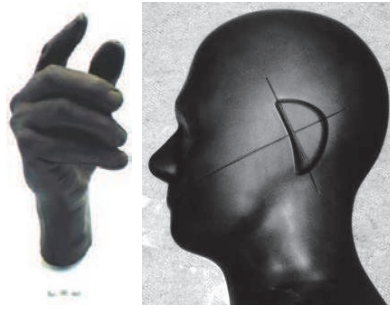


Figure I.12 - Fantômes solides réalistes composés de silicone chargé en poudre de carbone [40].

Récemment un fantôme solide à été développé pour étudier la propagation sur le corps à 60 GHz dans un contexte BAN [41]. Ce fantôme est composé de polydimethylsiloxane (PDMS) auquel est mélangé de la poudre de carbone permettant d'ajuster sa constante diélectrique, et d'un plan métallique en face arrière. C'est le premier fantôme solide utilisé en bande millimétrique. Il procure un coefficient de réflexion à l'interface air/fantôme équivalent à celui à l'interface air/peau sur la bande 58-63 GHz.

3. Evaluation de l'exposition dans le corps humain en bande millimétrique

3.1. Grandeurs dosimétriques

En bande millimétrique, le niveau d'exposition du corps humain à un rayonnement électromagnétique peut être évalué en termes de densité de puissance incidente, de débit d'absorption spécifique, ou bien d'élévation de température dans les tissus exposés.

3.1.1. Densité de puissance incidente

La densité de puissance incidente (P_0) est la principale quantité dosimétrique utilisée dans les standards internationaux pour quantifier les niveaux d'expositions limites du corps humain à un champ électromagnétique entre 10 et 300 GHz [42][43]. Cette quantité permet d'exprimer les expositions en puissance par unité de surface (W/m^2) via l'expression suivante :

$$P_0 = \frac{P}{S} = |\vec{E} \times \vec{H}| \quad (6)$$

où P est la puissance incidente (W), S la surface exposée (m^2); et où \vec{E} et \vec{H} sont respectivement les vecteurs champs électriques (V/m) et magnétiques (A/m).

3.1.2. Débit d'absorption spécifique

Le débit d'absorption spécifique (DAS) est la grandeur qui quantifie la puissance absorbée dans les tissus du corps humain par unité de masse (W/kg) lors d'une exposition à un champ électromagnétique. Il s'exprime analytiquement par :

$$DAS = \frac{P}{m} = \frac{\sigma |\vec{E}|^2}{2\rho} \quad (7)$$

où P est la puissance dissipée (W) dans une masse de tissu m (kg), σ est la conductivité électrique du tissu exposé (S/m), $|\vec{E}|$ est la valeur crête du champ électrique (V/m) et ρ la densité massique (kg/m^3).

Dans le cas d'exposition de courte durée ($t \rightarrow 0$), les effets de la conduction thermique sur la dynamique d'élévation de température ne sont pas significatifs, rendant possible l'estimation du DAS par :

$$DAS = c_p \left. \frac{dT}{dt} \right|_{t=0} \quad (8)$$

où c_p est la capacité thermique du tissu exposé ($J/kg/^\circ C$), dT l'élévation de température du tissu ($^\circ C$) sur la durée d'exposition dt (s).

3.1.3. Température en régime transitoire et/ou établi

La température en régime transitoire ou bien en régime établi se révèle aussi être une quantité importante pour évaluer les impacts d'expositions à moyenne ou bien à forte puissance. En effet, c'est l'échauffement thermique induit par l'absorption de champs électromagnétiques qui est à la l'origine des impacts sanitaires néfastes sur les tissus exposés.

3.2. Evaluations dosimétriques expérimentales

L'évaluation expérimentale du DAS local peut être effectuée à partir de deux types de mesures, soit (1) les mesures de champs électriques, soit (2) les mesures d'élévation de température à la surface ou bien à l'intérieur des tissus ou fantômes exposés.

La mesure des champs électriques a été standardisée internationalement pour les tests de conformité des téléphones mobiles entre 300 MHz et 3 GHz [44]. Cela permet de mesurer directement à l'intérieur des fantômes liquides, par exemple via l'utilisation de sondes attachées à un bras robotisé [45], les champs électriques induits par une exposition électromagnétique.



Figure I.13 - Scanner électromagnétique avec bras robotisé DASY52 SAR (Speag, Schmid & Partner Engineering AG, Zurich, Switzerland) [32].

Cependant, ce type de mesure directe n'est pas adapté pour la dosimétrie en bande millimétrique. En effet, les sondes de mesures ont des dimensions trop importantes par rapport aux longueurs d'ondes et à la profondeur de pénétration, et elles risquent donc de perturber la distribution des champs [14]. Les méthodes d'évaluation du DAS se basant sur les mesures d'échauffement sont mieux adaptées pour les évaluations dosimétriques en bande millimétrique. Il existe plusieurs techniques de mesure thermiques utilisables pour la dosimétrie thermique qui sont non ou bien faiblement invasives. Elles sont détaillées dans les sous-sections qui suivent.

3.2.1. Thermomètres à fibres optiques ou thermocouples

Les thermomètres à fibres optiques ou bien les thermocouples sont des dispositifs faiblement invasifs permettant de mesurer l'élévation de température très localement, en un point donné d'un fantôme ou bien d'un corps exposé à un rayonnement électromagnétique.

Les thermocouples sont des outils de mesure de température bon marché et permettant des mesures sur de larges gammes de température (plusieurs dizaines, voire centaines, de degrés Celsius). En revanche, leur incertitude de mesure est difficilement inférieure à ± 0.1 °C voir ± 0.2 °C. Le principe de mesure des thermocouples est basé sur l'effet de Seebeck [46], il consiste à mesurer la tension électrique aux extrémités restées libres de deux fils métalliques de natures différentes dont les deux autres extrémités sont soudées entre elles et exposées à une source de chaleur. Un thermocouple de type IT-23 (sensortek, Inc., Clifton, NJ) dont la précision est de $\pm 0,1$ °C est utilisé dans [47] pour estimer l'augmentation de température induite sur un fantôme par une antenne cornet ou bien un guide d'onde ouvert alimenté par des générateurs opérant à 42,25 GHz dont la puissance de sortie est de l'ordre de 50 mW.

Les thermomètres à fibre optique sont des instruments de mesure de température plus coûteux que les thermocouples. Comme ces derniers, ils permettent de mesurer les températures sur des plages de température de plusieurs centaines de degrés et ils ont une précision de mesure de

l'ordre de ± 0.1 °C. L'avantage de ce type d'outils de mesure est d'être insensible aux perturbations électromagnétiques [48].

3.2.2. Thermométrie infrarouge

La thermométrie infrarouge est une technique imagerie sans contact qui permet de mesurer les distributions de température en surface du fantôme ou bien du corps au cours du temps. Cette technique nécessite l'utilisation d'une caméra infrarouge haute-résolution. Plusieurs études dosimétriques en bande millimétrique utilisent cette technique de mesure pour étudier les élévations de température induites en surface de la peau [47] ou bien du fantôme [24], afin de déterminer les niveaux de DAS crête. Dans [47], la dynamique de l'élévation de température est mesurée par imagerie infrarouge à l'aide d'une caméra Amber 4256 (Amber Engineering, Inc., Goleta, GA) avec un niveau de bruit pic à pic de 0,056°C, et dans [24] c'est une caméra haute résolution FLIR SC5000 IR (FLIR Systems, Wilsonville, OR, USA) dont la sensibilité est de 0,025 °C qui est utilisée. Dans ces deux études, les DAS crêtes sont déterminés en utilisant une méthode basée sur l'accord entre la dynamique de température mesurée pour des temps très courts et le résultat calculé à partir de la solution analytique de l'équation 1D de bio-chaleur, pour un modèle de tissu à épaisseur semi-infinie [49], où la densité de puissance incidente P_0 est la seule inconnue de l'équation.

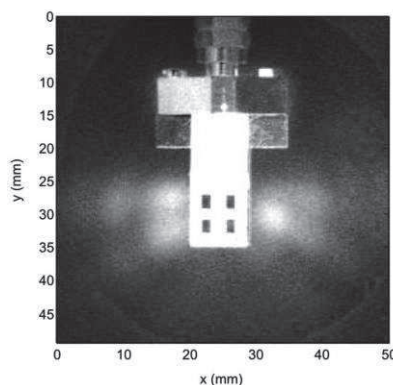


Figure I.14 - Distribution expérimentale à la surface d'un fantôme équivalent de la peau exposé à un réseau d'antennes à 60 GHz [50].

3.2.3. Cristaux thermosensibles

Les cristaux liquides thermosensibles peuvent être utilisés pour mesurer les distributions de température en surface du corps humain par contact, via l'utilisation de feuilles de cristaux liquides thermosensibles [51][52].

Les cristaux liquides thermo-chromatiques micro-encapsulés permettent eux d'analyser l'échauffement induit par une exposition électromagnétique dans des cavités oculaires de lapin (*in vivo*) [53][54]. Les cristaux (0,2 %) sont injectés dans les cavités oculaires afin de pouvoir visualiser les phénomènes de convection thermique dans l'humeur aqueuse. L'évolution de la température de ce liquide biologique de l'œil se traduit alors par le changement de couleur des cristaux. Cette évolution est enregistrée par une caméra vidéo permettant d'analyser ensuite l'évolution de l'échauffement et du flux thermique dans la cavité au cours de l'exposition.

L'étude présentée dans [53], où les yeux de lapin sont exposés à une source 40 GHz pour des densités de puissances comprises entre 100 et 400 mW/cm² pendant 10 min, montre que l'élévation de température ne se concentre pas seulement au niveau de la cornée, mais qu'elle

affecte aussi la lentille et l'iris de l'œil par le biais d'un phénomène de convection thermique dans l'humeur oculaire qui induit un transfert de chaleur de la cornée vers la lentille. Les conclusions sont similaires dans l'étude décrite dans [54] où les yeux sont cette fois exposés à une source 75 GHz pour des densités de puissance comprises entre 50 et 200 mW/m² pendant 30 min (Figure I.15).

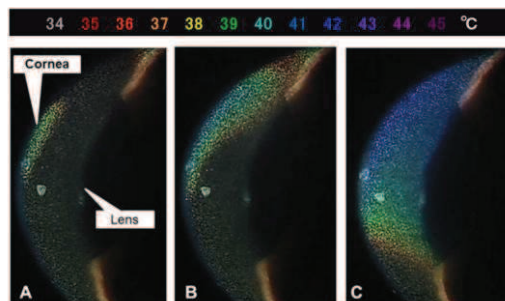


Figure I.15 - Variation au cours de l'exposition de la couleur des cristaux liquides thermo-chromiques micro-encapsulés injectés dans un oeil de lapin avant l'exposition à 75 GHz (200 mW/cm²). Vue en coupe de la cavité oculaire après (a) 3 sec, (b) 10 sec and (c) 60 sec d'exposition [54].

3.2.4. Imagerie thermique par résonance magnétique

L'imagerie thermique par résonance magnétique est une technique de mesure non invasive permettant d'obtenir la distribution en 3D de l'élévation de température à l'intérieur d'un fantôme équivalent ou bien d'une partie du corps humain. Cette technique est utilisée dans [55], pour l'étude dosimétrique d'un fantôme d'une tête humaine (SAM-V4.5; Speag, Zurich, Switzerland) (Figure I.16a) exposée à un téléphone mobile adjacent fonctionnant à 1900 MHz à pleine puissance pendant 15 min. Elle permet de réaliser une cartographie 3D (Figure I.16b) de la température dans le fantôme avant et après exposition afin de déduire l'échauffement induit par l'exposition, et donc de pouvoir calculer le DAS moyenné sur 10 g (Figure I.16c). Notons qu'au préalable, la précision de la technique de mesure thermométrique par résonance magnétique a été validée par la comparaison avec des mesures de température réalisées avec un thermomètre à fibre optique, révélant des erreurs inférieures à 0,15°C.

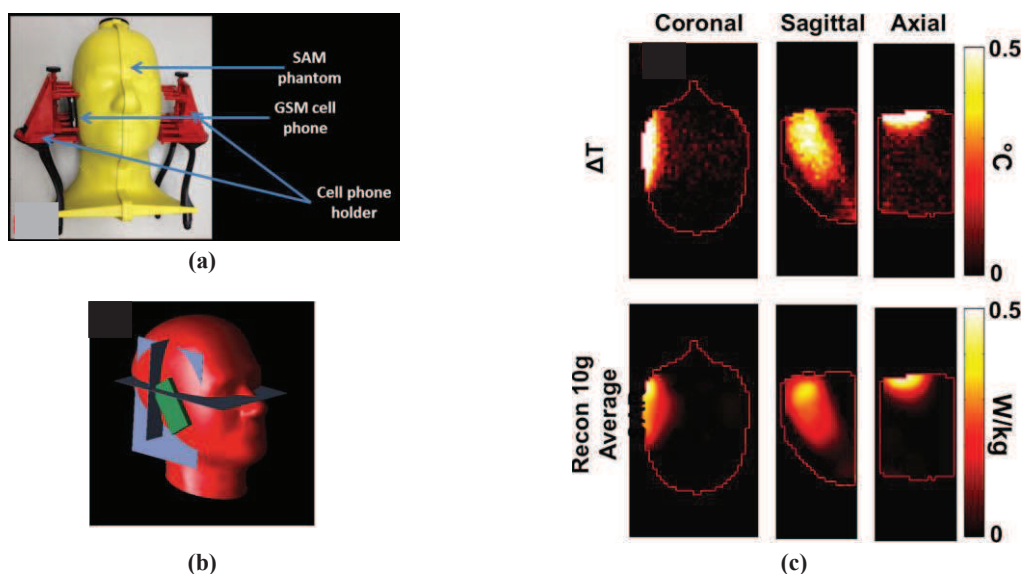


Figure I.16 - Imagerie thermique par résonance magnétique [55] ; (a) fantôme exposé, (b) plan d'intérêts de l'étude et (c) résultats thermiques et dosimétriques.

L'imagerie thermique par résonance magnétique a aussi été récemment utilisée pour quantifier les variations de température dans un fantôme et dans un mollet humain [56]. Une procédure d'acquisition semblable à celle décrite dans [55] a été utilisée ; en revanche dans cette étude, l'exposition a été générée par un guide d'onde alimenté par un générateur opérant à 42,25 GHz (40 mW/cm² pendant une durée de 5 min ou 10 min). Des variations de température maximales dans la zone du fantôme en contact avec l'extrémité du guide d'onde de 2,7 °C et 5,1 °C ont été relevées après respectivement 5 min et 10 min d'exposition. Dans le mollet, les variations de température dans la zone en contact avec le guide sont de l'ordre de 1,3 °C lors de la mesure de référence avant exposition, et elles passent à 4,75 °C lors de la mesure après une exposition de 5 min.

3.2.5. Bilan

Dans les sous sections précédentes, différentes techniques de mesure de température utilisables pour les études dosimétriques en millimétrique ont été présentées. Le tableau qui suit, résume les avantages et les inconvénients de chacune des techniques de mesure utilisées.

Tableau I.2 - Résumé des avantages et inconvénients des techniques de mesure thermométrique.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
<i>Thermocouples</i>	- Température dynamique	- Mesure locale - Erreur de mesure $> \pm 0,1$ °C - Invasif
<i>Thermomètres à fibre optique</i>	- Température dynamique - Insensible aux perturbations électromagnétiques	- Mesure locale - Erreur de mesure $> \pm 0,1$ °C - Invasif
<i>Camera infrarouge</i>	- Mesure 2D - Température dynamique - Erreur de mesure $< \pm 0,03$ °C - Non-invasif	- Impact des paramètres thermique de la caméra sur les résultats
<i>Cristaux thermosensibles</i>	- Mesure 2D - Température dynamique (via une caméra vidéo)	- Erreur de mesure - Invasif
<i>Imagerie thermique par résonance magnétique</i>	- Mesure 3D - Non-invasif	- Température instantanée - Faible sensibilité - données quantitative

3.3. Recommandations d'exposition du corps humain

En bande millimétrique, l'effet principal de l'absorption est l'échauffement des tissus exposés. Du fait de la faible profondeur de pénétration des champs électromagnétiques à ces fréquences (0.5 mm à 60 GHz), l'absorption est concentrée dans les couches superficielles du corps [14]. Actuellement, des limites d'exposition existent afin d'éviter l'apparition d'effets sanitaires néfastes.

Plusieurs organisations ou groupes de travail ont enquêté sur les effets nocifs pour la santé qui peuvent être induits par une exposition à des rayonnements non-ionisants. C'est par exemple le cas de l'ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) qui fournit des recommandations concernant les limites d'exposition jusqu'à 300 GHz [42] et de l'ICES (International Committee on Electromagnetic Safety) qui a rédigé le standard IEEE C95.1 [43]

qui limite les niveaux d'expositions aux champs électromagnétiques pour les fréquences allant de 3 kHz à 300 GHz.

3.3.1. Expressions des limites d'exposition

Les recommandations ou limites d'exposition définies par l'ICNIRP ou bien qui se trouvent dans le standard IEEE C95.1 sont établies à partir de données scientifiques qui relèvent les effets sanitaires observés sur des tissus biologiques exposés à des champs électromagnétiques. Ces recommandations sont exprimées en termes de *restrictions de base* ou bien de *niveaux de référence*, qui sont spécifiques à une bande de fréquence donnée. De plus, les limites d'exposition pour le grand public sont différentes de celles concernant les milieux professionnels contrôlés, où les personnes susceptibles d'être exposées à un rayonnement électromagnétique sont supposées conscientes des risques et aptes à prendre les précautions adéquates.

▪ Les restrictions de base (Basic Restrictions, BR)

Les BR s'expriment différemment en fonction de la fréquence d'exposition (Figure I.17). Elles ont pour objectifs d'éviter l'électrostimulation de certains tissus lors d'exposition à des fréquences inférieures à 5 MHz, et/ou l'échauffement excessif des tissus, qui est l'effet majeur de l'absorption de l'énergie électromagnétique au delà de 10 MHz. Dans les recommandations émises par l'ICNIRP, les BR sont exprimées soit en termes de densité de courant (J) de 1 Hz jusqu'à 10 MHz, soit en termes de DAS de 100 kHz à 10 GHz, ou encore en termes de densité de puissance incidente (P_0) entre 10 GHz et 300 GHz. Dans le standard IEEE C95.1, l'expression ainsi que les bandes de fréquence sur lesquelles les BR opèrent sont différentes. De 3 kHz à 5 MHz les BR s'expriment en termes de champ électrique in-situ (E) c'est-à-dire dans les tissus biologiques, entre 100 kHz et 3 GHz les BR sont données en termes de DAS , et de 3 GHz à 300 GHz en termes de P_0 .

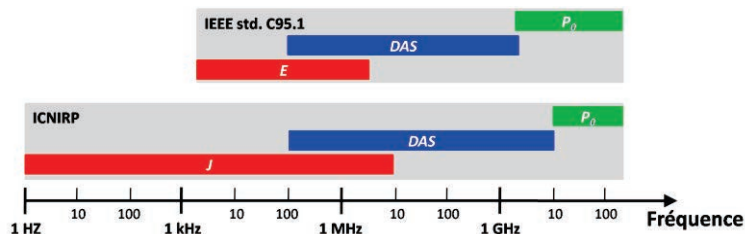


Figure I.17 - Répartition sur le spectre des fréquences des différentes quantités utilisées pour exprimer les BR par l'ICNIRP et le standard IEEE C95.1.

▪ Les niveaux de référence (Reference level, RL)

Les *niveaux de références (RL)* [42] (ou les *valeurs limites d'exposition maximales admissibles (MPE)* [43]) sont obtenus à partir des BR ; ils définissent les limites maximales des champs à ne pas dépasser en dehors du corps. Ils sont exprimés en termes de champ électrique (E), de champ magnétique (H), de densité de flux magnétique (B) et densité de puissance incidente (P_0). Dans les recommandations de l'ICNIRP, c'est l'amplitude crête des champs qui est considérée alors que dans le standard IEEE Std. C95.1 ce sont les valeurs efficaces.

Le non dépassement des RL permet de garantir que les BR sont en dessous des valeurs limites. En revanche dans le cas du dépassement des RL, les BR n'excèdent pas forcément les limites fixées.

3.3.2. Limites d'exposition en bande millimétrique

En bande millimétrique, les recommandations ou limites d'exposition sont exprimées en termes de densité de puissance incidente P_0 . Cependant, il est important de souligner que les recommandations actuelles ne fournissent pas de limite d'exposition pour les expositions en champ proche. Elles sont applicables uniquement dans le cas de configuration en champ lointain. En champ lointain, la distribution de champ a un caractère d'onde plane avec des composantes de champ (E et H) et une direction de propagation mutuellement perpendiculaires. De plus dans cette région la distribution de champ est indépendante de la distance de la source de rayonnement.

Les BR recommandées par l'ICNIRP et le standard IEEE C95.1 sont résumées dans le Tableau I.3. Elles montrent que les limites pour le grand public sont réduites soit par un facteur 5 [42], soit par un facteur 10 [43] (lorsque P_0 moyenné sur 100 cm²) par rapport à celles établies pour les milieux professionnels. Ces valeurs sont des valeurs moyennes établies pour des surfaces et des durées d'exposition spécifiques qui dépendent de la fréquence d'exposition en GHz. Les densités de puissance limites de base fournies par l'ICNIRP sont moyennées sur une surface du corps limité à 20 cm², alors que celle du standard IEEE C95.1 le sont sur 100 cm². Pour une surface exposée de 1 cm², la densité de puissance ne doit pas dépasser 20 fois celle moyennée sur 20 cm² pour l'ICNIRP, et pour le standard IEEE, elle ne doit pas dépasser 1000 W/m². Les recommandations fournies par le standard IEEE sont donc moins restrictives que celles définies par l'ICNIRP.

Les RL à ne pas dépasser sont résumées dans le Tableau I.4. Les BR et RL en bande millimétrique. Elles sont établies à partir des travaux traitant de l'élévation de température et de ses effets néfastes sur la santé, basés plus particulièrement sur les yeux [57][17].

Tableau I.3 - BR émises par l'ICNIRP ou le standard IEEE C95.1 pour les expositions locales en bande millimétriques.

Organisation	Environnement	Fréquence (GHz)	P_0 (W/m²)	Moyenne	
				Surface (cm²)	Temps (min)
ICNIRP	Professionnel	10-300	1000	1	$68/f^{1.05}$
	contrôlé		50	20	
	Grand public		200	1	
			10	20	
IEEE	Professionnel	30-300	1000	1	$2,524/f^{0.476}$
	contrôlé		100	100	
	Grand public	30-100	1000	1	$25,24/f^{0.476}$
			10	100	

Tableau I.4 - RL (ou MPE) relatives aux expositions localisées en bande millimétrique définies par l'ICNIRP et le standard IEEE C95.1.

Organisation	Environnement	Fréquence (GHz)	E (V/m)	H (A/m)	B (μ T)	P_{θ} (W/m ²)	Surface exposée (cm ²)
ICNIRP	Professionnel contrôlé	2-300	137	0,36	0,45	50	20
	Grand public		61	0,16	0,20	10	
IEEE	Professionnel contrôlé	3-300	-	-	-	100	100
	Grand public	30-100	-	-	-	10	

4. Problématique et contributions des travaux de thèse

Dans ce chapitre, nous avons présenté de façon succincte les différentes thématiques dans lesquelles s'inscrivent les travaux menés au cours de la thèse intitulée « *Réseaux corporels sans fil en ondes millimétriques : antenne, propagation et interactions avec le corps* ».

A travers la section 1, le large panel d'applications des réseaux de communications sans fils centrées sur le corps été souligné (santé, militaire, multimédia, etc.), ainsi que les avantages procurés pour ce type d'applications en bande millimétrique et plus particulièrement autour de 60 GHz (compacité des dispositifs, débit de données élevé, réduction du risque d'interférence, etc.). La modélisation du corps humain pour les études dosimétriques à 60 GHz a été abordée en section 2, mettant en avant qu'à cette fréquence la peau est la cible principale du rayonnement électromagnétique. Une revue des différents modèles diélectriques de la peau existants, étudiés et comparés dans différentes références bibliographiques a été résumée ici en termes de permittivité complexe, coefficient de réflexion en puissance et profondeur de pénétration du rayonnement. Les différents types de modèles expérimentaux du corps humain, appelés plus couramment fantômes ont également été décrits, en insistant particulièrement sur les développements récents de fantômes spécifiques à la bande 60 GHz. Les aspects d'évaluation et de quantification de l'absorption des champs électromagnétiques dans les tissus du corps humain lors d'une exposition ont été traités en section 3, avec, pour commencer, un rappel des différentes quantités dosimétriques en bande millimétrique, puis une comparaison des différentes techniques de mesure de température utilisables pour évaluer le DAS, et enfin un rappel des limites ou recommandations d'exposition fournies par l'ICNIRP ou bien le standard IEEE C95.1 en bande millimétrique.

Ce travail de synthèse a mis en évidence que les applications de communication sans fil centrées sur le corps à 60 GHz sont amenées à croître dans les années à venir, avec notamment le déploiement de la 5^{ème} génération de télécommunication mobile. Pour être en mesure de protéger efficacement les utilisateurs d'expositions électromagnétiques dont les niveaux pourraient générer un risque pour la santé de l'utilisateur, il est nécessaire d'accroître la quantité d'informations en termes d'évaluation, de quantification et de réduction du couplage corps/antennes à 60 GHz. C'est cette thématique qui a guidé les travaux menés durant la thèse.

La première contribution apportée par les travaux réalisés au cours de la thèse, a été de mettre en évidence et de quantifier l'impact que certains choix de conception pouvait avoir sur le couplage corps/antennes, comme par exemple la méthode d'alimentation d'antennes imprimées 60 GHz. Pour cela, nous avons optimisé et comparé numériquement puis expérimentalement les performances de plusieurs réseaux d'antennes imprimées spécifiques aux communications off-body, pour lesquels nous avons cherché à évaluer les effets de la présence du corps humain sur les performances antennaires ainsi que les niveaux d'exposition du corps.

La seconde contribution apportée se focalise elle sur les outils et les méthodes utilisés pour estimer l'impact thermique d'une source d'exposition électromagnétique à 60 GHz sur le fantôme équivalent. En effet, comme il a été montré dans la synthèse bibliographique, l'échauffement thermique est l'impact principal de l'absorption des champs électromagnétiques par la peau en bande millimétrique. Les méthodes d'évaluation dosimétrique à ces fréquences sont d'ailleurs basées sur des mesures de température de la peau ou du fantôme équivalent. L'utilisation de fantômes tend d'ailleurs à se généraliser pour les évaluations dosimétriques, en raison des

avantages de ces derniers en comparaison au corps pour la reproductibilité et la stabilité de mesures. Il est donc nécessaire de s'assurer de la fiabilité des résultats obtenus à partir de mesures sur fantômes. Pour ce faire, nous avons cherché à caractériser analytiquement le comportement thermique du fantôme équivalent de la peau à 60 GHz développé dans [24], puis à le valider numériquement et expérimentalement.

La troisième contribution de ce travail consiste à proposer une approche dosimétrique thermique pour l'évaluation des couplages corps/antenne en bande millimétrique. En effet, jusqu'à présent, les expositions relatives aux antennes BAN étaient évaluées dosimétriquement en termes de DAS ou bien de densité de puissance P_0 . Or dans le cadre d'exposition champ proche, ces quantités n'ont pas de limites d'exposition définies. De plus, l'approche thermique permet de donner une dimension temporelle au problème. Pour cela, l'absorption dans le fantôme du rayonnement des réseaux d'antennes imprimées off-body 60 GHz est évaluée numériquement et expérimentalement en termes de température en surface, en essayant de différencier l'échauffement induit par l'absorption du rayonnement électromagnétique de celui généré par l'élévation de température de la structure antennaire due aux pertes dans les matériaux.

5. Organisation du manuscrit

Avec ce **chapitre I** nous avons dressé une synthèse bibliographique des différentes thématiques sur lesquelles ont porté les travaux menés au cours de cette thèse, à savoir les réseaux de communications centrés sur le corps humain en bande millimétrique, la modélisation du corps humain à 60 GHz et l'évaluation de l'exposition du corps humain en bande millimétrique. Cette synthèse a permis de formuler la problématique à laquelle ont contribué les travaux réalisés.

La suite du manuscrit présente les contributions apportées par le travail effectué durant les trois années de la thèse, cette présentation est scindée en deux parties.

La **première partie** regroupe les résultats obtenus dans le cadre d'une étude consacrée à l'évaluation et la quantification de l'impact sur le couplage corps/antenne de la méthode d'alimentation d'antennes imprimées pour les communications off-body à 60 GHz. Cette première partie est elle même divisée en deux chapitres :

Le **chapitre II** qui vise à quantifier numériquement l'impact que peuvent avoir certains choix de conception sur le couplage corps/antenne à 60 GHz. Ce chapitre commence par faire une rapide revue des antennes BAN déjà développées à 60 GHz, ainsi que les méthodes utilisées pour réduire le couplage corps/antenne en bandes de fréquence plus basses. Cette revue est ensuite suivie d'une analyse des différentes méthodes pour l'alimentation d'antennes imprimées et pour l'augmentation de la bande passante des antennes patch. Cette analyse doit permettre de sélectionner les méthodes les plus adéquates en vue du type de communications à réaliser. Après analyse des différents choix de conception possibles, plusieurs réseaux d'antennes à 60 GHz ont été optimisés numériquement. Les structures et géométries de ces différents réseaux sont présentées dans ce chapitre ainsi que leurs performances antennaires numériques en espace libre et sur fantôme équivalent, de même qu'une analyse dosimétrique numérique à 60 GHz.

Le **chapitre III** vise lui à confirmer expérimentalement, après réalisation et mesure des prototypes des réseaux d'antennes imprimées 60 GHz, les conclusions établies numériquement dans le chapitre II concernant l'impact des choix de conception sur le couplage corps/antennes à 60 GHz. Ce chapitre détaille les séquences de fabrications nécessaires à la réalisation des différents réseaux d'antennes, ainsi que les limites et contraintes technologiques auxquelles ont été soumises les réalisations. Les performances antennaires expérimentales des prototypes en espace libre et sur le fantôme équivalent sont également présentées et comparées aux résultats numériques.

La **seconde partie** du manuscrit est dédiée à la modélisation thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz utilisé dans le cadre de l'évaluation thermique des niveaux d'exposition aux champs électromagnétiques. Le travail réalisé dans cette partie est réparti sur trois chapitres :

Le **chapitre IV** qui propose le modèle thermique analytique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz. Ce chapitre commence par un tour d'horizon des différents modèles thermiques exprimant analytiquement l'échauffement des tissus du corps humain lors d'expositions à un champ électromagnétique. Puis, il rappelle les notions de base en thermodynamique, avant de passer à la caractérisation thermique du fantôme équivalent de la peau, ainsi qu'à la description analytique des transferts de chaleur définissant le comportement thermique du fantôme lors de l'exposition à une onde plane. Enfin il expose la résolution de l'équation de transfert de chaleur spécifique au modèle thermique du fantôme et l'analyse du comportement de la solution analytique.

Le **chapitre V** valide numériquement et expérimentalement le comportement thermique du fantôme équivalent décrit par la solution analytique établie dans le chapitre IV. Pour se faire, les résultats d'élévation de température calculés avec la solution analytique sont comparés aux résultats obtenus avec un modèle numérique équivalent. Puis, le comportement du modèle numérique d'un modèle équivalent du dispositif expérimental est lui-même comparé à des mesures d'élévation de température réalisées sur plusieurs épaisseurs de fantôme par thermométrie infrarouge via une analyse paramétrique numérique. Cette analyse établit les plages d'élévation de température dites de confiance, à partir des incertitudes connues ou estimées pour les différents paramètres du dispositif mesure ainsi que pour les propriétés du fantôme. Pour finir, ce chapitre compare le comportement thermique du modèle de fantôme homogène à celui d'un modèle de tissus multicouches représentatif du corps humain.

Le **chapitre VI** vise à quantifier pendant les expositions électromagnétiques, l'impact thermique sur le fantôme induit par l'exposition au rayonnement électromagnétique généré par les différents réseaux d'antennes off-body 60 GHz. Pour cela, les contributions des sources d'échauffement du fantôme sont analysées et quantifiées numériquement ainsi qu'expérimentalement.

Nous terminerons par une conclusion générale portant sur l'ensemble des travaux de thèse, en mettant en évidence les liens et la logique du travail effectué à travers un résumé des chapitres, et par une synthèse des résultats et des conclusions importantes formulées à la fin de chacun d'eux.

6. Références

- [1] P. S. Hall and Y. Hao, *Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communication*, Second Edition. London: Artech House, 2012.
- [2] “Bowi project,” available online at <http://www.bowi.cominlabs.ueb.eu/fr/results>
- [3] M. Patel and J. Wang, “Applications, challenges, and prospective in emerging body area networking technologies,” *Wirel. Commun. IEEE*, vol. 17, no. 1, pp. 80–88, 2010.
- [4] “MiWaves project,” available online at <http://www.miwaves.eu/>
- [5] H. C. Lee, *A MAC Throughput in the Wireless LAN*. INTECH Open Access Publisher, 2012.
- [6] A. Pellegrini, A. Brizzi, L. Zhang, K. Ali, Y. Hao, X. Wu, C. C. Constantinou, Y. Nechayev, P. S. Hall, N. Chahat, and others, “Antennas and propagation for body-centric wireless communications at millimeter-wave frequencies: A review [wireless corner],” *Antennas Propag. Mag. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 262–287, 2013.
- [7] P. F. M. Smulders, “Impact of regulations on feasible distance between 60 GHz devices,” in *Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on*, 2010, pp. 1–4.
- [8] P. F. M. Smulders, “Exploiting the 60 GHz Band for Local Wireless Multimedia Access: Prospects and Future Directions,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 40, no. 1, pp. 140–147, Jan. 2007
- [11] “Soli,” available online at http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1326726.
- [10] S. L. Cotton, W. G. Scanlon, and B. K. Madahar, “Millimeter-wave soldier-to-soldier communications for covert battlefield operations,” *Commun. Mag. IEEE*, vol. 47, no. 10, pp. 72–81, 2009.
- [11] S. Alipour, F. Parvaresh, H. Ghajari, and F. K. Donald, “Propagation characteristics for a 60 GHz wireless body area network (WBAN),” in *MILITARY COMMUNICATIONS CONFERENCE, 2010-MILCOM 2010*, 2010, pp. 719–723.
- [12] N. Rendeviski and D. Cassioli, “UWB and mmWave Communication Techniques and Systems for Healthcare,” in *Ultra-Wideband and 60 GHz Communications for Biomedical Applications*, Springer., Australia: Mehmet R. Yuce, 2014, pp. 1–22.
- [7] “GlucoWISE,” available online at <http://www.gluco-wise.com>
- [14] M. Zhadobov, N. Chahat, R. Sauleau, C. Le Queument, and Y. Le Drian, “Millimeter-wave interactions with the human body: state of knowledge and recent advances,” *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 3, no. 02, pp. 237–247, Apr. 2011.
- [15] T. Wu, T. S. Rappaport, and C. M. Collins, “Safe for Generations to Come: Considerations of Safety for Millimeter Waves in Wireless Communications,” *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 65–84, Mar. 2015.
- [16] A. Papaioannou and T. Samaras, “Numerical Model of Heat Transfer in the Rabbit Eye Exposed to 60-GHz Millimeter Wave Radiation,” *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 58, no. 9, pp. 2582–2588, Sep. 2011.
- [17] M. Kojima, M. Hanazawa, Y. Yamashiro, H. Sasaki, S. Watanabe, M. Taki, Y. Suzuki, A. Hirata, Y. Kamimura, and K. Sasaki, “Acute ocular injuries caused by 60-GHz millimeter-wave exposure,” *Health Phys.*, vol. 97, no. 3, pp. 212–218, 2009.
- [18] F. A. Duck, *Physical Properties of Tissue: A Comprehensive Reference Book*, Academic Press. Harcourt Brace Jovanovich, 1990.

- [19]S. I. Alekseev, A. A. Radzievsky, M. K. Logani, and M. C. Ziskin, "Millimeter wave dosimetry of human skin," *Bioelectromagnetics*, vol. 29, no. 1, pp. 65–70, Jan. 2008.
- [20]S. I. Alekseev and M. C. Ziskin, "Human skin permittivity determined by millimeter wave reflection measurements," *Bioelectromagnetics*, vol. 28, no. 5, pp. 331–339, Jul. 2007.
- [26]S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, pp. 2271–2293, 1996.
- [22]N. Chahat, M. Zhadobov, R. Augustine, and R. Sauleau, "Human skin permittivity models for millimetre-wave range," *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 7, pp. 427–428, 2011.
- [23]W. J. Ellison, "Permittivity of Pure Water, at Standard Atmospheric Pressure, over the Frequency Range 0 - 25 THz and the Temperature Range 0 - 100 °C," *J Phys Chem Ref Data*, vol. 36, no. 1, pp. 1–18, 2007.
- [24]N. Chahat, M. Zhadobov, and R. Sauleau, "Broadband Tissue-Equivalent Phantom for BAN Applications at Millimeter Waves," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 7, pp. 2259–2266, Jul. 2012.
- [25]T. Wu, T. S. Rappaport, and C. M. Collins, "Safe for Generations to Come: Considerations of Safety for Millimeter Waves in Wireless Communications," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 65–84, Mar. 2015.
- [26]N. Chahat, M. Zhadobov, R. Sauleau, and S. I. Alekseev, "New Method for Determining Dielectric Properties of Skin and Phantoms at Millimeter Waves Based on Heating Kinetics," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 3, pp. 827–832, Mar. 2012.
- [27]O. P. Gandhi and A. Riazi, "Absorption of millimeter waves by human beings and its biological implications," *Microw. Theory Tech. IEEE Trans. On*, vol. 34, no. 2, pp. 228–235, 1986.
- [28]C. M. Alabaster, "Permittivity of human skin in millimetre wave band," *Electron. Lett.*, vol. 39, no. 21, pp. 1521–1522, 2003.
- [29]F. S. Barnes and B. Greenebaum, *Bioengineering and biophysical aspects of electromagnetic fields*. CRC, 2006.
- [30]A. T. Mobashsher and A. M. Abbosh, "Artificial Human Phantoms: Human Proxy in Testing Microwave Apparatuses That Have Electromagnetic Interaction with the Human Body," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, no. 6, pp. 42–62, Jul. 2015.
- [31]M. Y. Kanda, M. Ballen, S. Salins, C.-K. Chou, and Q. Balzano, "Formulation and Characterization of Tissue Equivalent Liquids Used for RF Dosimetry and Dosimetry Measurements," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 52, no. 8, pp. 2046–2056, Aug. 2004.
- [30]SPEAG, "Posable EM Phantoms POPEYE V5.5 and POPEYE3TO6 V5.5", available online at <http://www.speag.com/products/em-phantom/whole-body/posable-phantom-popeye/>
- [33]A. W. Guy, "Analyses of electromagnetic fields induced in biological tissues by thermographic studies on equivalent phantom models," *Microw. Theory Tech. IEEE Trans. On*, vol. 19, no. 2, pp. 205–214, 1971.
- [34]K. Ito, K. Furuya, Y. Okano, and L. Hamada, "Development and Characteristics of a Biological Tissue-Equivalent Phantom for Microwaves," *Electron. Commun. Jpn.*, vol. 84, no. 4, pp. 67–77, Apr. 2001.
- [35]H.-Y. Lin, M. Takahashi, K. Saito, and K. Ito, "Performance of implantable folded dipole antenna for in-body wireless communication," *Antennas Propag. IEEE Trans. On*, vol. 61, no. 3, pp. 1363–1370, 2013.

- [36] H. Mizuno, M. Takahashi, K. Saito, N. Haga, and K. Ito, "Design of a helical folded dipole antenna for biomedical implants," in *Antennas and Propagation (EUCAP), Proceedings of the 5th European Conference on*, 2011, pp. 3484–3487.
- [37] R. Aminzadeh, M. Saviz, and A. A. Shishegar, "Theoretical and experimental broadband tissue-equivalent phantoms at microwave and millimetre-wave frequencies," *Electron. Lett.*, vol. 50, no. 8, pp. 618–620, 2014.
- [38] T. Kobayashi, T. Nojima, K. Yamada, and S. Uebayashi, "Dry phantom composed of ceramics and its application to SAR estimation," *Microw. Theory Tech. IEEE Trans. On*, vol. 41, no. 1, pp. 136–140, 1993.
- [39] H. Tamura, Y. Ishikawa, T. Kobayashi, and T. Nojima, "A dry phantom material composed of ceramic and graphite powder," *Electromagn. Compat. IEEE Trans. On*, vol. 39, no. 2, pp. 132–137, 1997.
- [40] C. Gabriel, "Tissue equivalent material for hand phantoms," *Phys. Med. Biol.*, vol. 52, no. 14, pp. 4205–4210, Jul. 2007.
- [41] A. R. Guraliuc, M. Zhadobov, O. De Sagazan, and R. Sauleau, "Solid Phantom for Body-Centric Propagation Measurements at 60 GHz," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 62, no. 6, pp. 1373–1380, Jun. 2014.
- [48] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (Up to 300 GHz), vol. 74. Health Physics, 1998.
- [43] IEEE International Committee on Electromagnetic Safety on Non-Ionizing Radiation, Institute of Electrical and Electronics Engineers, and IEEE-SA Standards Board, *IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3kHz to 300 GHz*. New York, N.Y.: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006.
- [44] Institute of Electrical and Electronics Engineers, *IEEE recommended practice for determining the peak spatial-average specific absorption rate (SAR) in the human head from wireless communications devices measurement techniques*. New York: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2003.
- [45] T. Schmid, O. Egger, and N. Kuster, "Automated E-field scanning system for dosimetric assessments," *Microw. Theory Tech. IEEE Trans. On*, vol. 44, no. 1, pp. 105–113, 1996.
- [46] "Aviatechno," available online at <http://aviatechno.net/thermo/thermo01.php>.
- [47] S. I. Alekseev and M. C. Ziskin, "Local heating of human skin by millimeter waves: A kinetics study," *Bioelectromagnetics*, vol. 24, no. 8, pp. 571–581, Dec. 2003.
- [48] "National instrument," available online at <http://www.ni.com/white-paper/11821/fr/>.
- [49] K. R. Foster, H. N. Kritikos, and H. P. Schwan, "Effect of surface cooling and blood flow on the microwave heating of tissue," *Biomed. Eng. IEEE Trans. On*, no. 3, pp. 313–316, 1978.
- [50] N. Chahat, M. Zhadobov, L. Le Coq, S. I. Alekseev, and R. Sauleau, "Characterization of the Interactions Between a 60-GHz Antenna and the Human Body in an Off-Body Scenario," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 12, pp. 5958–5965, Dec. 2012.
- [51] W. Gómez, M. A. V. Krüger, W. C. A. Pereira, L. Leija, and A. Vera, "Analysis of SAR with Thermochromic Liquid Crystal Sheets in Focused Ultrasound Beam," in *XX Brazilian Biomedical Engineering Congress*, 2006.
- [52] L. Cristoforetti, R. Pontalti, L. Cescatti, and R. Antolini, "Quantitative Colorimetric Analysis of Liquid Crystal Films (LCF) for Phantom Dosimetry in Microwave Hyperthermia," *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, vol. 40, no. 11, pp. 1159–1165, Nov. 1993.

- [53] M. Kojima, N. Hasanova, K. Sasaki, H. Sasaki, K. Wake, S. Watanabe, Y. Suzuki, M. Taki, Y. Kamimura, and A. Hirata, "Investigation of ocular temperature change in rabbits during 40 GHz band exposure," in *Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE), 2012 International Symposium on*, 2012, pp. 1–4.
- [54] M. Kojima, C.-Y. Tsai, Y. Suzuki, K. Sasaki, K. Wake, S. Watanabe, Y. Kamimura, A. Hirata, M. Taki, K. Sasaki, and H. Sasaki, "Millimeter wave exposure induces cornea and lens epithelium damag," presented at the BioEM 2014, Cape Town, South Africa, 2014, pp. 315–319.
- [55] L. Alon, G. Y. Cho, X. Yang, D. K. Sodickson, and C. M. Deniz, "A method for safety testing of radiofrequency/microwave-emitting devices using MRI: Safety Testing of RF/Microwave-Emitting Devices," *Magn. Reson. Med.*, p. n/a–n/a, Nov. 2014.
- [56] L. Alon, W. S. Slovinsky, G. Y. Cho, D. K. Sodickson, C. M. Collins, M. Ziskin, T. S. Rappaport, and C. M. Deniz, "mmWave Exposure Assessment using Magnetic Resonance Thermal Imaging," presented at the BioEM 2015, Asilomar, California, USA, 2015, pp. 357–360.
- [57] H. A. Kues, S. A. D'Anna, R. Osiander, W. R. Green, and J. C. Monahan, "Absence of Ocular Effects After Either Single or Repeated Exposure to 10 mW/cm² From a 60 GHz CW Source," *Bioelectromagnetics*, vol. 20, no. 1, pp. 463–473, 1999.

Chapitre II. Impact de la méthode d'alimentation d'antennes imprimées sur le couplage antenne/corps à 60 GHz : évaluation et quantification numérique

Sommaire

1.	Introduction	33
1.1.	Antennes pour les communications centrées sur le corps à 60 GHz	33
1.2.	Réduction du couplage corps/antenne	36
1.3.	Objectif.....	41
2.	Conception et optimisation de réseaux d'antennes imprimées off-body à 60 GHz	43
2.1.	Théorie des antennes patch micro-ruban	43
2.2.	Matériels et méthodes.....	46
3.	Comparaison des méthodes d'alimentation de réseaux d'antennes imprimées 60 GHz.....	49
3.1.	Structures et géométries des réseaux d'antennes	49
3.2.	Adaptation sur la bande 60 GHz.....	56
3.3.	Performances en rayonnement à 60 GHz	60
3.4.	Analyse dosimétrique à 60 GHz de l'exposition du fantôme équivalent de la peau	67
4.	Conclusions	72
5.	Références	74

1. Introduction

1.1. Antennes pour les communications centrées sur le corps à 60 GHz

En bande millimétrique, les communications BAN concernent les liaisons de type *on-* ou bien *off-body*. En effet, en raison de la faible profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique dans les tissus, les communications *in-body* sont difficilement envisageables. Cependant, l'affaiblissement du signal dans la graisse du corps humain a récemment été étudié numériquement en THz dans le cadre de nano-communications pour les applications BAN, pour évaluer la faisabilité de liaisons *in-body* avec des dispositifs biomédicaux implantés pour la stimulation d'organes ou le monitoring [1].

Dans les sous-sections qui suivent, plusieurs antennes dédiées aux communications sur le corps humain à 60 GHz sont présentées. Cette liste d'antennes n'est pas exhaustive, mais elle donne un aperçu des différentes antennes déjà développées en bande millimétrique pour les communications *on-* ou bien *off-body*.

1.1.1. Spécificités générales

En raison de l'intérêt récent de la bande millimétrique pour le développement des communications centrées sur le corps humain, les exemples d'antennes BAN dans cette bande de fréquences sont moins nombreux qu'en micro-ondes par exemple. Cependant, quelle que soit la bande de fréquence, les exigences pour les antennes BAN sont semblables [2] ; elles doivent être :

(1) facilement intégrables sur le corps humain, ce qui signifie compactes, légères, planaires ou conformables, (les antennes imprimées sont de parfaites candidates) ;

(2) robustes, pour que leurs performances restent stables en présence du corps et qu'elles soient fonctionnelles en cas de mouvements du corps.

En plus de ces exigences communes à toutes les antennes BAN, il est possible que, dans certains contextes d'application, des contraintes supplémentaires soient imposées aux antennes, comme d'être *déformables* (flexible et/ou étirable si l'antenne est placée sur les vêtements ou bien la peau) ou bien *résistantes à des contraintes de température, de pression ou d'humidité* (par exemple dans le cadre d'applications militaires [3]). Dans la littérature, on trouve de nombreux exemples d'antennes BAN fonctionnant sur des bandes de fréquence en dessous de 10 GHz réalisées avec des matériaux souples et déformables, tels que les substrats textiles [4][5] et polymères [6][7][8], où les métallisations sont en électro-textile [9][10] ou bien des fils métalliques brodés [11][12][13].

1.1.2. Antennes pour liaisons *on-body*

Les antennes *on-body* permettent d'assurer la liaison entre deux dispositifs BAN placés sur le corps humain. Pour être capables d'effectuer ce type de liaison, les antennes *on-body* requièrent un gain avoisinant 10 dBi en raison du fort affaiblissement du signal à 60 GHz ; de plus, la direction du rayonnement maximal de l'antenne doit être parallèle à la surface du corps pour limiter les risques d'interférences avec les systèmes de communication voisins.

▪ Antennes *end-fire*

Les antennes *end-fire* tel que les antennes *Yagi-Uda* ou bien *Vivaldi* sont des modèles d'antenne particulièrement adéquats pour les communications *on-body*. Dans la littérature, on trouve plusieurs modèles d'antennes *Yagi-Uda* développés récemment pour les communications sur le corps à 60 GHz.

Dans [14] et [15], des antennes *Yagi-Uda* réalisées sur un substrat Rogers Duroid 5880 ($\epsilon_r = 2,2$ et $\tan \delta = 0,003$) sont proposées pour des communications sur le corps. Dans [14], l'antenne *Yagi-Uda* proposée (Figure II.1a) est alimentée par un guide d'onde intégré au substrat (Substrate Integrated Waveguide ou SIW en anglais), son coefficient de réflexion S_{11} est adapté sur une bande de fréquence de l'ordre de 1 GHz autour de la fréquence de résonance 60 GHz. L'ouverture à mi-puissance de son diagramme de rayonnement est de $20,5^\circ$ dans le plan E (plan perpendiculaire au substrat) et $24,5^\circ$ dans le plan H (plan parallèle au substrat). Ses performances sont comparées numériquement et expérimentalement en espace libre, montrant un bon accord entre simulation et mesure avec des gains maximaux respectifs de 13,7 dBi et 12,5 dBi. Cependant l'impact de la présence du corps n'a pas été analysé contrairement au réseau d'antennes imprimées *Yagi-Uda* (Figure II.1b) présenté dans [15]. Dans [15], le réseau d'antennes est adapté sur une bande de fréquence large de 5 GHz (de 55 à 60 GHz) et permet d'obtenir une antenne à fort gain du fait de la mise en réseau d'antennes *Yagi-Uda* (15,67 dBi en espace libre et 15 dBi sur le fantôme).

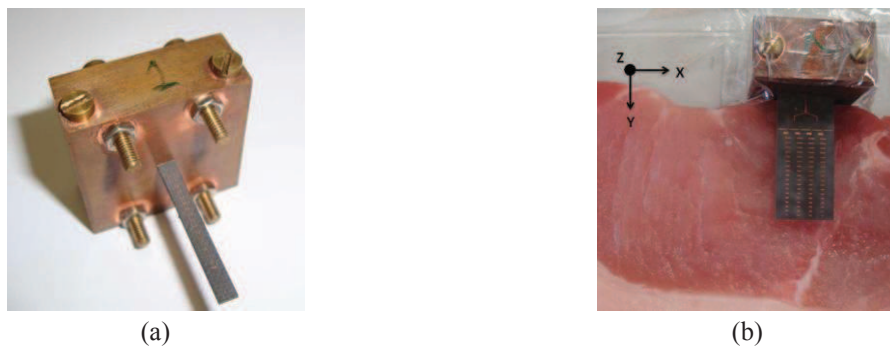


Figure II.1 - Antenne *Yagi-Uda* pour les communications *on-body* à 60 GHz : (a) alimentée par SIW [14]; (b) mise en réseau de 4 branches [15].

Plus récemment encore, une antenne *Yagi-Uda* (Figure II.2) a été développée à l'IETR sur substrat textile ($\epsilon_r = 1,5$ et $\tan \delta = 0,016$) en suivant la procédure de fabrication sur textile détaillée dans [16]. Un très bon accord est constaté entre les niveaux de coefficient de réflexion simulés et mesurés, l'antenne est adaptée sur la bande 57 - 64 GHz en espace libre et sur un fantôme équivalent de la peau. L'efficacité mesurée de cette antenne est de 48 %, et le gain maximal de 11,9 dBi à 60 GHz.



Figure II.2 - Antenne *Yagi-Uda* sur substrat textile pour les communications *on-body* à 60 GHz [16].

■ Antenne bouton

Plusieurs études dans les bandes inférieures aux fréquences millimétriques ont cherché à valoriser des éléments déjà présents sur les vêtements en les utilisant comme antennes, comme par exemple le zip d'une fermeture [17] ou bien des boutons [18].

Une antenne fonctionnant sur la bande des 60 GHz et visant à être intégrée dans un bouton (Figure II.3a) a été développée dans le même état d'esprit [19]. Cette antenne est de petite taille et discrète, elle est adaptée sur une bande de fréquence s'étalant de 59,3 - 63,4 GHz (7 % de bande passante relative). Ses performances numériques et expérimentales en espace libre ont été comparées à celles obtenues sur un fantôme homogène équivalent de la peau. Le modèle de rayonnement de cette antenne est optimisé pour les communications *on-body*, car le rayonnement est (1) maximal dans le plan du substrat qui est tangentiel à la surface du fantôme (Figure II.3b), (2) alors qu'il est réduit dans le plan perpendiculaire au substrat (Figure II.3c). Une augmentation du gain est notable lorsque l'écartement avec le fantôme se réduit en raison des réflexions à la surface du fantôme (de 5,2 dBi à 6,7 dBi lorsque le gap entre l'antenne et le fantôme passe de 10 mm à 5 mm).

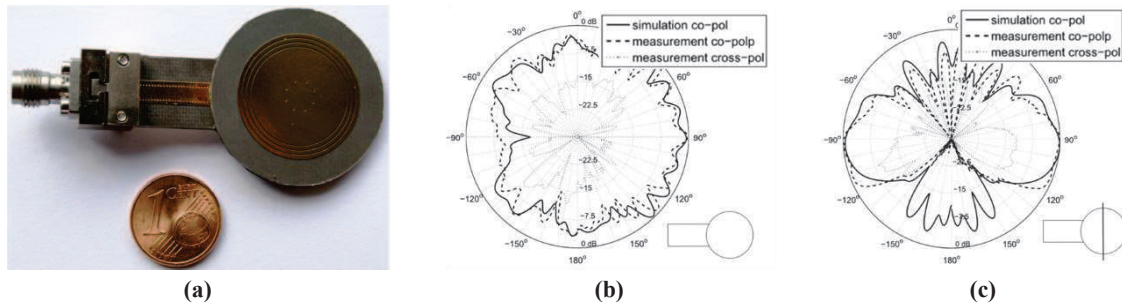


Figure II.3 - Antenne bouton pour les communications *on-body* à 60 GHz [19].

1.1.3. Antennes pour communications *off-body*

Les antennes *patch* sont des solutions très appropriées pour les communications de type *off-body* [2]. En effet, ce type d'antenne possède un modèle de rayonnement avec (1) un faible rayonnement arrière qui limite le couplage avec le corps humain en raison de la présence de plan de masse en face arrière et (2) une large ouverture à -3 dB maximisant la liaison entre le dispositif sur le corps et celui situé à proximité du corps. De plus, ce type d'antennes offre la possibilité d'un gain ajustable par la mise en réseau de plusieurs éléments rayonnants unitaires. Pour les liaisons *off-body* un gain de l'ordre de 12 dBi - 15 dBi est nécessaire. Cette valeur s'explique par la forte atténuation atmosphérique à 60 GHz [20] ainsi que par les limites en vigueur concernant la puissance transmise par les antennes 60 GHz [21].

Deux réseaux d'antennes imprimées rectangulaires 2×2 éléments micro-ruban (Figure II.4a) pour les communications *off-body* ont été optimisés par Chahat *et al.* sur substrat organique de type Rogers duroïd 5880 ($\epsilon_r = 2,2 \pm 0,2$ et $\tan \delta = 0,003$ à 60 GHz) [22] et sur substrat textile ($\epsilon_r = 2$ et $\tan \delta = 0,02$ à 60 GHz) [23], permettant d'obtenir des gains de 11,8 dBi et 8 dBi, respectivement en espace libre. Dans les deux cas, les performances sont faiblement sensibles à la présence du fantôme.

L'analyse de l'effet du rayon de courbure du substrat sur les performances antennaires du réseau réalisé sur textile (Figure II.4b) montre un faible impact. En effet pour un rayon de courbure variant de 15 à 5 mm, le gain passe de 9 dBi à 7,9 dBi.

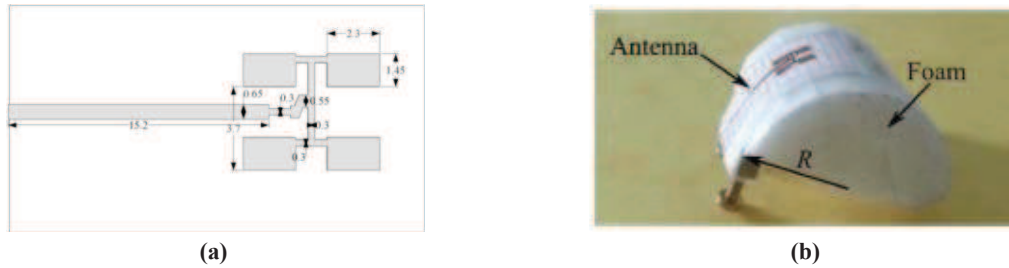


Figure II.4 - Réseaux d'antennes micro-ruban 2×2 éléments sur textile [23].

Récemment un réseau d'antennes fentes en anneau rectangulaire SIW de 2×2 éléments a été développé pour les communications *off-body* à 60 GHz (Figure II.5). Ce réseau mesure 23 mm par 15 mm ; il est réalisé sur un substrat de type Arlon CuClad 212 ($\epsilon_r = 2,2$) d'épaisseur 0,508 mm. Ses performances antennaires ont été évaluées numériquement sous CST MWS en espace libre et en présence d'un fantôme équivalent de la peau ($\epsilon_r = 7,98$ et $\sigma = 36,4$ S/m à 60 GHz) de dimensions 100 mm \times 100 mm \times 3 mm, et mesurées en espace libre.

Les résultats obtenus par simulation montrent que l'impact du fantôme sur les performances du réseau est faible, puisque que la bande passante est de 4,5 % à -10 dB aussi bien en espace libre qu'en présence du fantôme, et que le gain est de 12,8 dBi en espace libre et de 12,4 dBi en présence du fantôme. De plus les diagrammes de rayonnement montrent que ce réseau d'antennes est adéquat pour les communications *off-body*, en raison d'un rayonnement maximal dans le plan perpendiculaire au plan de l'antenne.

L'adaptation et le modèle de rayonnement du réseau sont confirmés par les résultats de mesure. En mesure la bande passante en espace libre est 5,7 %, et le gain de 13 dBi. De plus, un très bon accord est obtenu entre les diagrammes simulés et mesurés.

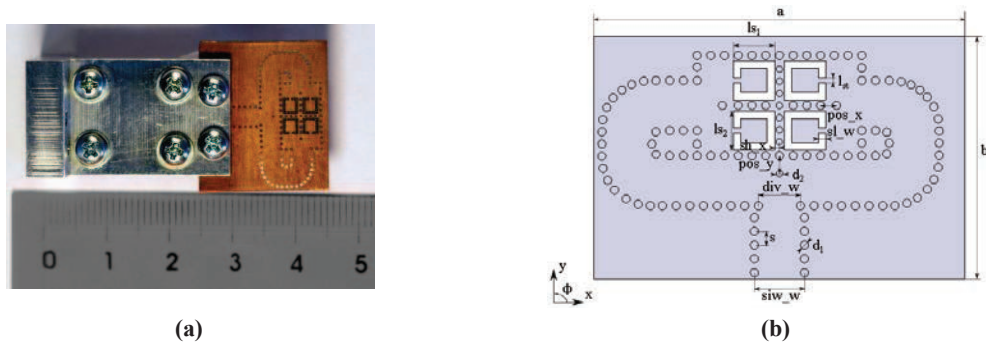


Figure II.5 - Réseau d'antennes fentes en anneaux rectangulaire en SIW 2×2 éléments sur un substrat Arlon CuClad217 [24].

1.2. Réduction du couplage corps/antenne

Avec l'explosion du nombre de dispositifs de communications situés à proximité ou même en contact du corps humain (téléphones mobiles, réseaux de communication sans fil, réseau corporel etc.), on observe une augmentation de l'attention des utilisateurs concernant la prévention des effets sanitaires induits par les expositions aux ondes électromagnétiques. Ce qui pousse donc au développement de solutions efficaces pour réduire le couplage corps/antenne. Cependant, il est important de préciser que les études n'ont été menées que dans le cadre d'expositions à des champs électromagnétiques inférieurs à 10 GHz ; aucune étude de ce genre n'a été réalisée en bande millimétrique à notre connaissance. Dans ce qui suit, les différentes solutions existantes

▪ Feuilles résistives ou R-cards

Les R-cards sont des couches résistives permettant d'atténuer les niveaux de champs électromagnétiques rayonnés par une antenne à laquelle peut être exposé un utilisateur de téléphone mobile. L'atténuation induite par les R-card est liée à une transformation d'impédance. L'impédance Z d'une R-card est définie analytiquement par :

$$Z = (\sigma \times h)^{-1} \quad (1)$$

où σ est la conductivité électrique (S/m) et h l'épaisseur de la R-card (m).

Dans [28], la réduction de DAS induite par le positionnement d'une R-card sur le combiné d'un téléphone portable est étudiée numériquement et expérimentalement (Figure II.7a). L'antenne du combiné est un monopole fonctionnant à 1,8 GHz, dont la puissance rayonnée est de 125 mW. L'impact sur les performances d'antenne et sur la réduction de DAS est quantifié en fonction du positionnement de la R-card sur le combiné (position i : sur clavier ; position ii : sur écran et ; position iii : autour de l'antenne en Figure II.7b) et de l'impédance de la R-card qui varie de 5 Ω à 1150 Ω . L'étude montre que l'utilisation de R-card peut réduire les DAS_{1g} et DAS_{10g} de plus de 60 % (le DAS_{1g} passe de 1,226 W/kg à 0,432 W/kg lorsque qu'une R-card d'impédance 36 Ω est placée sur l'écran) avec un impact minimum sur les performances de l'antenne.

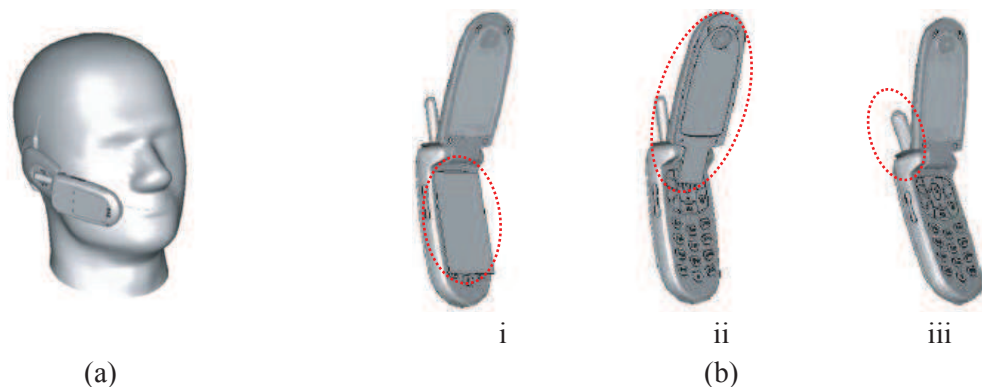


Figure II.7 - (a) Configuration d'exposition du fantôme SAM considérée et (b) les différentes positions de la R-card sur le combiné du téléphone mobile [28].

▪ Matériaux conducteurs

Dans [29], un élément conducteur en aluminium ($\sigma = 3,54 \times 10^7$ S/m) est utilisé expérimentalement comme matériau de blindage positionné sur les combinés de quatre téléphones mobiles différents (Figure II.8) fonctionnant en bande GSM 900 MHz (puissance de transmission 2 W). Les niveaux de DAS sont très impactés par la localisation de l'antenne (antenne interne ou externe au combiné). En effet pour une même position de l'élément de blindage sur les combinés (Figure II.8), une réduction maximale du SAR de 63 % est observée pour le modèle Nokia 82XX où l'antenne est intégrée au combiné, alors que pour les autres modèles les réductions sont inférieures à 20 %.

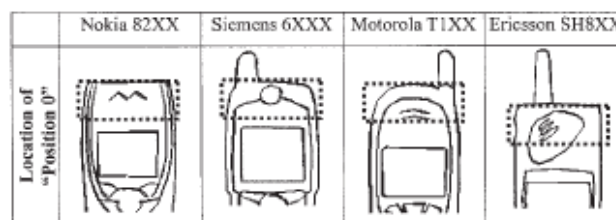


Figure II.8 - Illustration de la position du conducteur sur les 4 combinés mobiles [29].

L'impact du positionnement du matériau conducteur attaché à un téléphone mobile est étudié numériquement dans [30]. Le téléphone mobile est modélisé par un élément métallique rectangulaire ($40 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$) sur le haut duquel est montée une antenne ellipse quart d'onde opérant à 900 MHz dont la puissance rayonnée est de 500 mW. Une plaque d'aluminium de $40 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ est placée sur le mobile. Les résultats numériques obtenus ont montrés que ce type de blindage pouvait induire une réduction de DAS comprise entre 2,3 % et 26,4 % en fonction de la position de la plaque conductrice sur le mobile, avec un impact sur les performances antennaires minime.

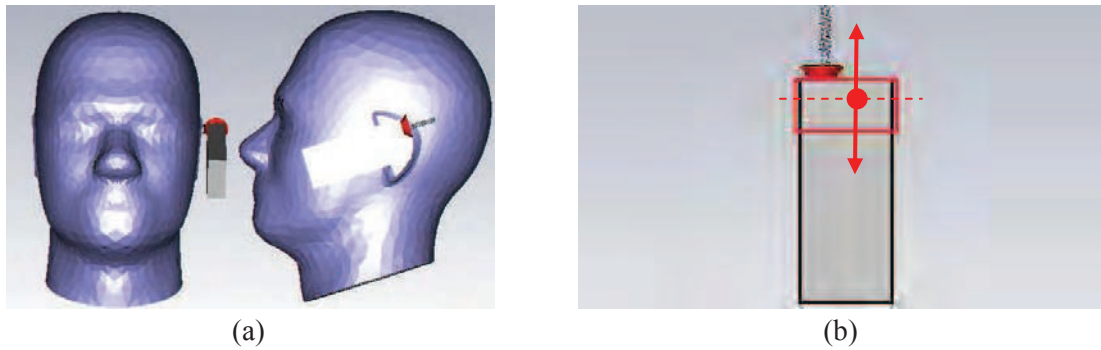


Figure II.9 - Illustrations (a) de la position du combiné sur le fantôme et (b) de la position du conducteur sur le combiné [30].

1.2.2. Les EBG et les métamatériaux

La réduction des interactions corps/antenne via la mise en place d'une couche de EBG ou de métamatériau entre l'élément rayonnant et la partie du corps susceptible d'être exposée a fait l'objet de nombreuses études.

Plusieurs exemples de métamatériaux ont été développés à des fins de réduction du couplage corps/antenne, comme des structures de type (1) AMC (Conducteur Magnétique Artificiel), (2) SHI (Surface Haute Impédance) [31], ou encore (3) SRR (Split Ring Resonator) [32]. Ces structures sont périodiques, elles sont composées d'éléments unitaires dont le modèle a été optimisé pour produire une inversion de phase du coefficient de réflexion à une fréquence donnée comme dans les exemples qui suivent.

Dans [33], un réseau de 3×3 éléments EBG de type croix de Jérusalem (Figure II.10a) imprimé sur une mousse flexible d'épaisseur 3 mm à faible perte ($\epsilon_r = 1,05$ et $\tan \delta = 0,0001$) avec un conducteur de type électro-textile Zelt d'épaisseur 0,06 mm ($\sigma = 1 \text{ MS/m}$), est utilisé pour améliorer les performances et réduire le couplage avec le corps d'une antenne double bandes à 2,45 GHz et 5,5 GHz fabriquée avec les mêmes matériaux que la structure EBG. La particularité de cette structure EBG en forme de croix de Jérusalem est qu'elle induit deux bandes interdites liée aux inversions de la phase du coefficient de réflexion. Les dimensions du motif après optimisation induisent des bandes interdites centrées sur 2,43 GHz et sur 5,72 GHz (Figure II.10b). L'adaptation et les performances de l'antenne sont simulées en espace libre et en présence du fantôme homogène avec et sans la structure EBG. Sans structure EBG, les performances de l'antenne sont fortement affectées par la présence du fantôme (désadaptation, dégradation de l'efficacité de rayonnement etc.) en raison d'un modèle de rayonnement proche de celui d'un dipôle, qui induit un rayonnement important en direction du corps. Avec la structure EBG, le rayonnement arrière est réduit (- 15 dB), limitant les interactions avec le corps et améliorant le gain dans la direction opposée. L'intégration de la structure EBG, permet en plus de réduire le DAS_{1g} de plus 95 % à 2,45 GHz, 2,59 GHz et 5,5 GHz.

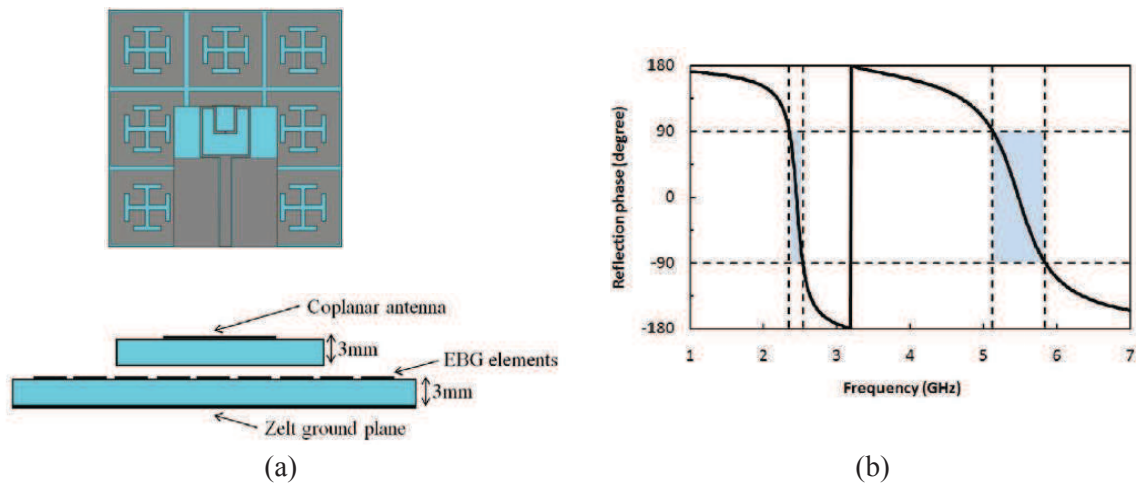


Figure II.10 - Réseau 3×3 d'éléments EBG de type croix de Jérusalem [33]. (a) Illustration du réseau ainsi que de la position relative de l'antenne, et (b) la phase du coefficient de réflexion sur la bande de fréquence 1 - 7 GHz.

Une étude semblable a été réalisée dans [34], cette fois sur un substrat élastique. Un réseau de 3×3 éléments unitaires de type AMC (Figure II.11a) est utilisé pour réduire le couplage entre le corps et une antenne Yagi-Uda opérant à 2,44 GHz. La structure AMC et l'antenne sont imprimées par sérigraphie sur des substrats flexibles de type latex ($\epsilon_r = 3,31$ et $\tan \delta = 0,028$) d'épaisseur 1 mm et 3 mm. Les dimensions de la cellule unitaire de l'AMC sont optimisées pour avoir une inversion de la phase du coefficient de réflexion à 2,44 GHz. Les performances de l'antenne sont évaluées en espace libre et en présence du corps. Sans structure AMC entre l'antenne et le corps, l'efficacité de l'antenne chute de 86 % en espace libre à 29,4 % en présence du corps, et un pic de DAS moyenné sur 10 g de 4,2 W/kg est relevé. Lorsque la structure AMC est présente, l'efficacité est plus stable (74,8 %) et le pic de DAS est limité à 1,24 W/kg, soit une réduction de près de 70 %.

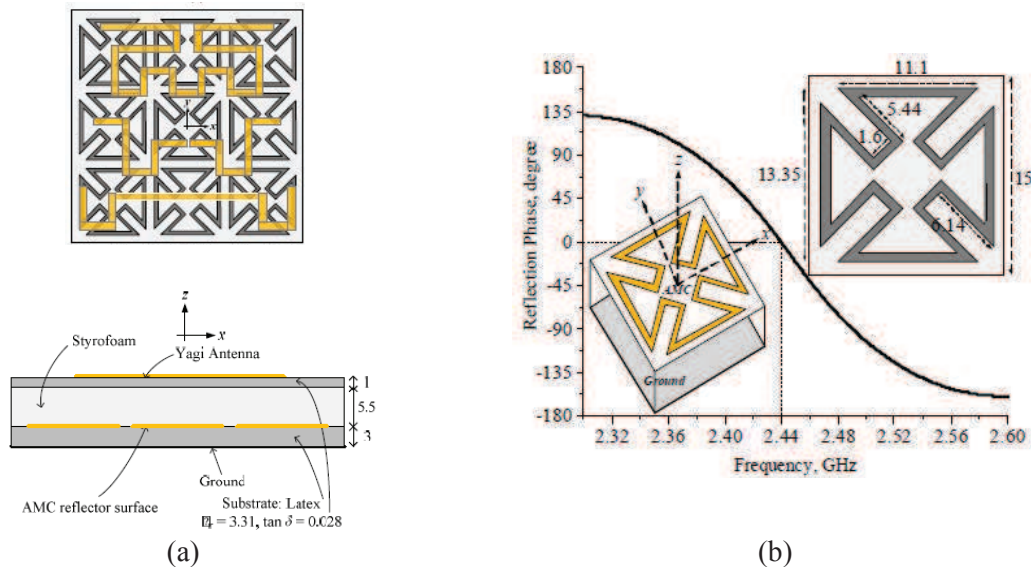


Figure II.11 - Réseau 3×3 d'éléments AMC [34]. (a) Illustration du réseau ainsi que de la position relative de l'antenne, et (b) la phase du coefficient de réflexion sur la bande de fréquence 2.3 - 2.6 GHz

Récemment un motif FSS (Frequency Selective Surface) permettant de filtrer le rayonnement Wifi à été optimisé afin d'être intégré sur un substrat en papier peint [35]. Les motifs FSS sont imprimés sur le papier avec une encre conductrice dont la conductivité électrique est de $1,5 \times 10^6$

S/m. Ce motif permet d'obtenir une atténuation de l'ordre de 25 dB du signal wifi quelque soit l'angle d'incidence.

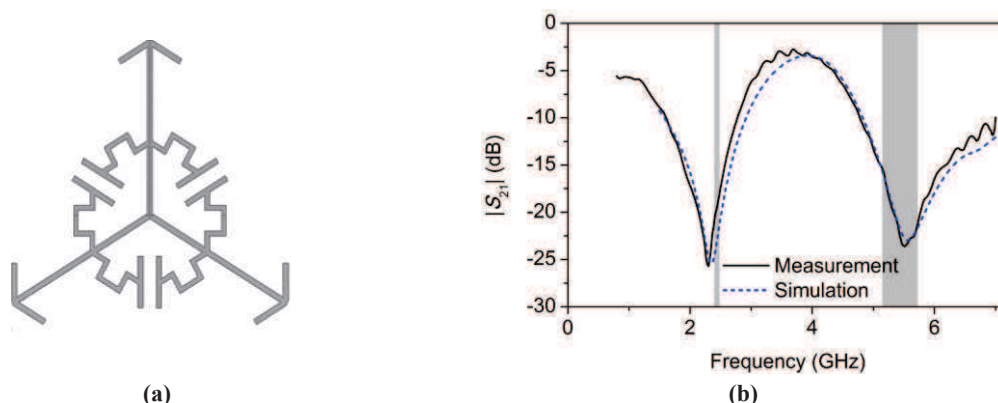


Figure II.12 - Structure FSS pour filtrage du signal Wifi [35] : (a) Motif et (b) coefficient de transmission.

1.2.3. Bilan

Dans cette sous-section, différentes solutions permettant de réduire le couplage corps/antennes ont été proposées. En comparant les réductions apportées sur les valeurs de DAS moyennées résumées en Tableau II.1, on constate que certaines solutions peuvent se révéler très efficaces.

Tableau II.1 - Récapitulatif des réductions de DAS engendrées par chaque solution de blindage.

Solution	Fréquence	Réduction du DAS
<i>Feuilles de ferrite</i>	900 MHz	- 52 %
	2.4 GHz	Entre - 85 % et - 90 % selon le type de ferrite
<i>R-card</i>	1.8 GHz	Supérieur à - 60 %
<i>Conducteur (plaque)</i>	900 MHz	Jusqu'à 63 %
<i>EBG et métamatériaux</i>	2.45 et 5.5 GHz	Entre -70% et -95% selon la structure

1.3. Objectif

Plusieurs antennes 60 GHz ont d'ores et déjà été imaginées et développées spécialement pour les communications sans fils centrées sur le corps humain avec un intérêt marqué pour l'intégration des antennes sur les vêtements (antennes textiles et antenne bouton). Cependant, à notre connaissance, la quantification et la réduction du couplage corps/antenne n'a pas fait l'objet de recherches approfondies à 60 GHz, contrairement aux bandes de fréquences inférieures à 10 GHz. En effet, il existe de nombreuses études pour les bandes dédiées à la téléphonie mobile ou bien Wifi, dans lesquelles sont optimisées des solutions de blindage permettant de réduire les niveaux de DAS moyennés de plusieurs dizaines de pourcents en assurant en même temps la stabilité des performances des antennes en présence du corps humain.

La réduction du couplage corps/antenne est un critère majeur pour le développement des réseaux de communication sans fil en bande millimétrique, en raison notamment du manque de données expérimentales à ces fréquences et de l'absence actuelle de recommandations concernant les niveaux d'exposition du corps humain dans le contexte BAN en exposition champ proche. La

problématique du chapitre est donc la suivante : Comment réduire le couplage corps/antenne des dispositifs BAN à 60 GHz en respectant les exigences de compacité et de performances requises ?

Pour répondre à cette problématique nous nous sommes intéressés à l'impact sur le couplage corps/antenne à 60 GHz, d'un élément important pour le fonctionnement d'une antenne : son alimentation. Dans ce chapitre, plusieurs méthodes permettant d'alimenter un réseau d'antennes imprimées 2×2 dédié aux communications sur le corps à 60 GHz sont comparées numériquement en termes de structure et géométrie, d'adaptation sur la bande 55 - 65 GHz, de performances de rayonnement et de DAS à 60 GHz. Cette comparaison doit permettre de quantifier l'impact de chacune des méthodes considérées.

La section 2 de ce chapitre décrit et explique les différents choix technologiques effectués lors de la phase de conception et d'optimisation de réseaux d'antennes imprimées 60 GHz. Dans la section 3, les différents réseaux d'antennes optimisés sont comparés en fonction de leur méthode d'alimentation. Enfin la section 4 résume les critères importants à considérer lors du choix de la méthode d'alimentation et la conception d'un réseau d'antennes *off-body*.

2. Conception et optimisation de réseaux d'antennes imprimées off-body à 60 GHz

Rappelons que les antennes spécifiques aux liaisons *off-body* doivent : (1) limiter le rayonnement en direction du corps ; (2) avoir un gain typique compris entre 10 et 12 dBi ; (3) avoir un diagramme de rayonnement avec une ouverture large. Les antennes patch micro-ruban sont donc de très bonnes candidates pour ce type de communications. Par ailleurs, un réseau d'antennes imprimées de 2×2 éléments rectangulaires a déjà été optimisé à l'IETR pour les communications *off-body* à 60 GHz [22]. En prenant comme point de départ ce réseau d'antennes, nous nous sommes intéressés aux différents choix de conception possibles permettant à la fois d'optimiser les performances d'un réseau d'antennes 2×2 et de minimiser le couplage corps/antenne à 60 GHz.

La sous-section 2.1 fait une revue des caractéristiques des antennes patch, ainsi que des différentes techniques d'alimentation et d'augmentation de bande passante existantes spécifiques à ce genre d'antennes. Les choix effectués en termes de conception y sont expliqués et justifiés. La sous-section 2.2 détaille la méthode numérique utilisée pour optimiser les dimensions des réseaux d'antennes, ainsi que les propriétés diélectriques et thermo-physiques des matériaux utilisés dans les modèles en guise de substrat et fantôme équivalent.

2.1. Théorie des antennes patch micro-ruban

2.1.1. Généralités

Une « *antenne patch micro-ruban* » se réfère à une antenne imprimée de forme variable (rectangulaire, circulaire, triangulaire, annulaire, etc.), gravée sur un substrat diélectrique dont la face opposée est un plan de masse [36].

Les antennes imprimées/patch sont utilisées dans de nombreuses applications, comme pour les communications mobiles ou spatiales. Ces antennes possèdent plusieurs avantages qui font d'elles des solutions très attractives : (1) elles sont discrètes et légères ; (2) elles sont robustes ; (3) leur fabrication est généralement simple et de faible coût ; (4) de plus la mise en réseau de ce type d'antenne est simple [37]. Cependant, ce type d'antennes possède aussi de certains inconvénients comme un gain faible (de l'ordre de 5 - 6 dBi pour un élément unitaire), et surtout une faible largeur de bande passante, généralement en dessous de 5 % de bande passante relative [38].

2.1.2. Alimentation

Il existe plusieurs techniques pour alimenter une antenne patch micro-ruban. Ces techniques peuvent être classées en trois catégories [38] :

(1) les techniques d'alimentation en contact direct avec l'antenne patch, comme dans le cas de l'alimentation par sonde coaxiale (Figure II.13a) ou bien par ligne micro-ruban (Figure II.13b) ;

(2) les techniques où l'antenne est alimentée par couplage électromagnétique avec un élément situé à proximité comme par exemple une ligne micro-ruban enterrée dans le substrat (Figure II.13c) ;

(3) les techniques d'alimentation par couplage via une fente, elle même excitée par couplage avec par exemple une ligne micro-ruban (Figure II.13d).

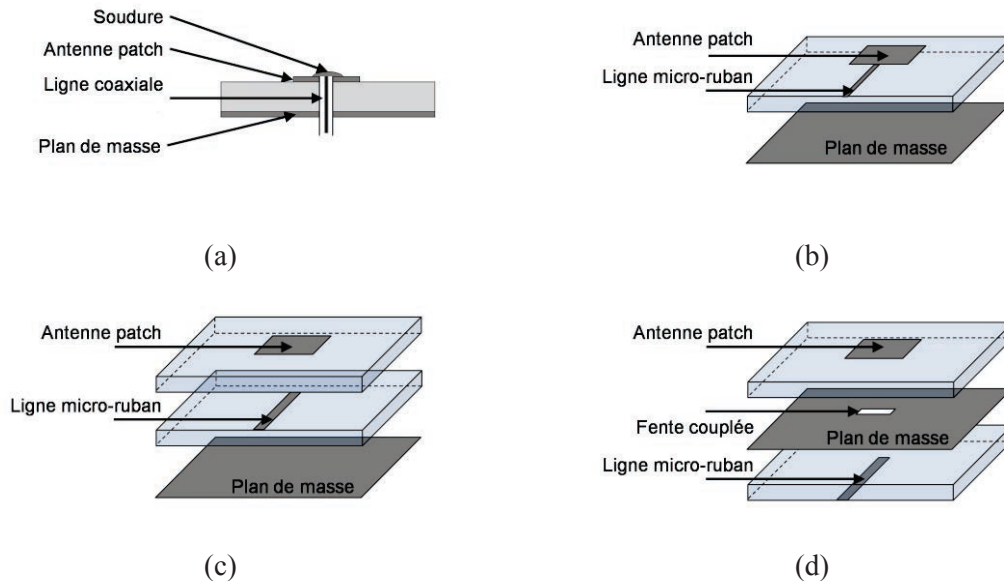


Figure II.13 - Illustration des techniques d'alimentation possibles pour une antenne patch micro-ruban : (a) alimentation par sonde coaxiale, (b) alimentation par contact avec une ligne micro-ruban, (c) alimentation par couplage avec une ligne micro-ruban enterrée et (d) alimentation par couplage par fente.

▪ Alimentation par ligne coaxiale

L'alimentation d'une antenne patch par sonde coaxiale consiste à venir souder au patch une sonde coaxiale traversant le substrat et le plan de masse. L'avantage que procure cette technique d'alimentation est qu'elle permet d'isoler les éléments de traitement de signal comme des filtres ou bien des déphaseurs, minimisant ainsi les rayonnements parasites. Cependant, la complexité de fabrication augmente avec cette technique pour les structures multicouche et les réseaux d'antennes.

▪ Alimentation par ligne micro-ruban

La technique d'alimentation par ligne micro-ruban consiste à venir mettre en contact un des cotés rayonnants de l'antenne patch avec une ligne micro-ruban. La fabrication d'une antenne patch avec cette technique d'alimentation est simple, car la gravure du patch et de son arborescence d'alimentation se fait sur la même face métallisée du substrat. En revanche, cette technique induit un rayonnement parasite élevé des lignes d'alimentation susceptible de perturber le modèle de rayonnement de l'antenne.

▪ Alimentation par couplage avec une ligne micro-ruban enterrée

Pour alimenter une antenne patch par couplage de proximité, l'arborescence d'alimentation est généralement enterrée dans le substrat, mais elle peut aussi être placée sur la même couche que l'antenne. Le plan de masse et l'antenne patch sont séparés par deux couches de substrat entre lesquelles est intégrée l'arborescence d'alimentation en ligne micro-ruban enterrée. L'avantage de cette technique d'alimentation est qu'elle permet d'avoir des antennes avec une bande passante plus large qu'avec les techniques précédentes en contact direct. Cependant, elle présente en contre

partie plusieurs inconvénients. Le premier est que le réseau d'alimentation n'est pas complètement indépendant des antennes patch induisant des rayonnements parasites avec des niveaux pouvant être assez élevés. Le deuxième, est que cette méthode nécessite une structure multicouche de substrat qui complexifie la procédure de fabrication.

- **Alimentation par fente couplées**

Avec cette technique d'alimentation, l'antenne est séparée de l'arborescence d'alimentation par deux couches de substrats entre lesquelles se situe un plan de masse où est gravée la fente permettant d'exciter le patch par couplage électromagnétique. Un des avantages de cette technique est que l'arborescence d'alimentation est indépendante de la couche d'élément rayonnant, et peut être optimisée séparément. Un autre avantage est que cette technique ne nécessite pas de connexion verticale comme dans le cas de l'alimentation par ligne coaxiale. Cependant, cette technique impose une structure multicouche qui peut avoir un impact important sur les performances de l'antenne en raison de la précision d'alignement entre couches notamment aux très hautes fréquences.

- **Bilan**

Dans le cadre d'applications BAN, l'alimentation par ligne coaxiale risque d'induire un encombrement du système d'alimentation important du côté du corps humain. Il a donc été choisi d'exclure cette méthode d'alimentation de notre étude comparative, de même que la méthode d'alimentation par couplage en raison du cumul des inconvénients en termes à la fois de conception et de performances. Sont uniquement conservées les méthodes d'alimentation par ligne micro-ruban et par fente couplée.

2.1.3. Elargissement de la bande passante

La bande de fréquence 60-GHz est une large bande de fréquences libres de droits, comprise entre 57 et 66 GHz en Europe et entre 57 et 64 GHz sur le continent Nord-Américain, soit respectivement 15 % et 12 % de bande passante. Néanmoins, comme nous l'avons déjà précisé, les antennes patch micro-ruban possèdent un inconvénient majeur, qui est une faible largeur de bande passante (entre 1 % et 5 %).

De nombreux travaux ont été consacrés à l'élargissement de la bande passante de ce type d'antennes et ont abouti à plusieurs solutions pour permettre de pallier ce problème tel que : (1) l'augmentation de l'épaisseur du substrat entre l'antenne et le plan de masse : cette solution permet d'avoir des antennes avec des bandes passantes comprises entre 4 % et 6 % [38] ; (2) le couplage avec des patches parasites (Figure II.14a) : cette solution consiste à venir ajouter dans un même plan des antennes patch aux dimensions légèrement différentes de celles de l'antenne principale, induisant des fréquences de résonance parasites très proches de celles de l'antenne principale permettant d'élargir la bande passante. Elle permet d'obtenir des bandes passantes relatives pouvant atteindre 20 %. Cependant cette technique d'élargissement de bande passante présente plusieurs inconvénients : le premier est que la mise en réseau induit l'apparition de lobes de réseau, le second est que le rayonnement des éléments parasites a tendance à être déformé [36] et le troisième est que l'encombrement augmente ; (3) l'empilement (Figure II.14b) est une technique fréquemment utilisée dans la littérature pour élargir la bande passante d'une antenne patch : il consiste à venir placer au dessus de l'antenne patch principale une seconde antenne gravée sur un substrat dont l'autre face n'est pas métallisée. Cette technique permet d'obtenir des bandes

passantes pouvant atteindre 30 %, et elle est de plus adaptée à la conception de réseau d'antennes [36]. Cette liste n'est pas exhaustive, et il existe dans la littérature d'autres techniques d'augmentation de bande passante, mais qui peuvent être spécifiques à une méthode d'alimentation donnée comme par exemple les technique à antenne patch à fente [39] qui est spécifique aux méthodes d'alimentation par couplage. Cette technique est difficile à utiliser en bande millimétrique, en raison des contraintes de précision de la technologie imprimée à ces fréquences.

L'augmentation de bande passante apportée par ces différentes techniques n'est cependant pas identique, ce qui nécessite de choisir la technique d'élargissement de bande passante en fonction du pourcentage de bande passante visé. En ce qui concerne la solution à privilégier dans le cadre des applications BAN à 60 GHz, il faut garder à l'esprit qu'elle doit permettre aux antennes de rester compactes. De plus, elle doit aussi être compatible avec la mise en réseau. La technique qui semble la mieux adaptée pour augmenter la bande passante de nos réseaux d'antennes 2×2 à 60 GHz, est la méthode des antennes patch empilées.

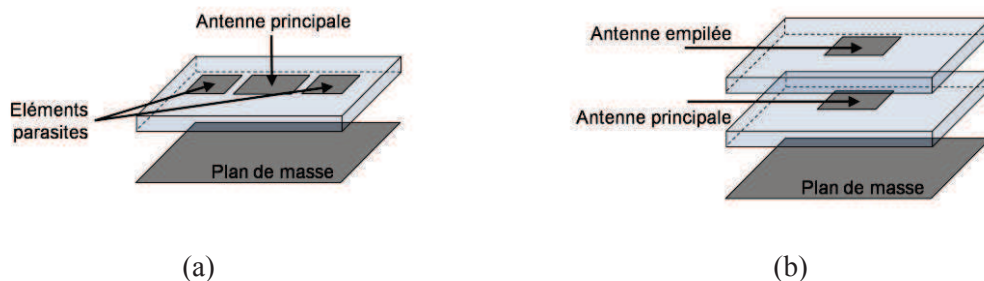


Figure II.14 - Schémas des solutions permettant l'élargissement de la bande passante d'une antenne patch micro-ruban. (a) Technique de couplage avec du patch principal avec des patches parasites et (b) technique d'empilement d'antennes patch.

2.2. Matériels et méthodes

2.2.1. Outils numériques

Les géométries et les dimensions des réseaux d'antennes imprimées ont été optimisées en utilisant le logiciel CST Studio Suite. Plus précisément nous avons utilisé CST Microwave Studio (MWS) qui est un module de la simulation électromagnétique 3D permettant l'analyse de composants hyperfréquences tels que des antennes. Ce module intègre plusieurs solveurs de calcul dont un solveur temporel qui permet de calculer les paramètres S sur de larges bandes de fréquences.

Pour l'ensemble des modèles numériques simulés dans ce chapitre, nous avons utilisé : (1) des couches absorbantes parfaitement adaptées (en anglais "Perfectly matched layer" ou PML) comme conditions limites de simulation ; (2) des ports d'excitation de type guide d'onde dont les dimensions respectent pour chaque réseau les recommandations données dans l'aide du logiciel ; (3) et le maillage local pour les parties des structures antennaires les plus critiques ($\lambda_g/15$ est la dimension maximale du maillage), tels que les réseaux d'alimentation ou bien les antennes patch, mais aussi pour le maillage du fantôme équivalent, où les 0,5 mm sous la surface exposée sont maillés avec un ratio de $\lambda_g/50$ suivant z et alors que le reste du fantôme est maillé avec un ratio $\lambda_g/20$.

Des moniteurs sont définis pour calculer les performances de rayonnement à 60 GHz, ainsi que le DAS en post-traitement pour une puissance injectée au réseau d'antenne de 10 mW. Cette puissance est liée aux législations en vigueur résumées dans [21], où les limites de puissance moyennes ou pics sont exprimées en fonction du gain de l'antenne 60 GHz (Figure II.15). En choisissant d'injecter une puissance de 10 mW à des antennes dont le gain est de l'ordre de 12 dBi, les normes imposées pour les communications de dispositifs mobiles ou portables 60 GHz à proximité du corps sont toutes respectées.

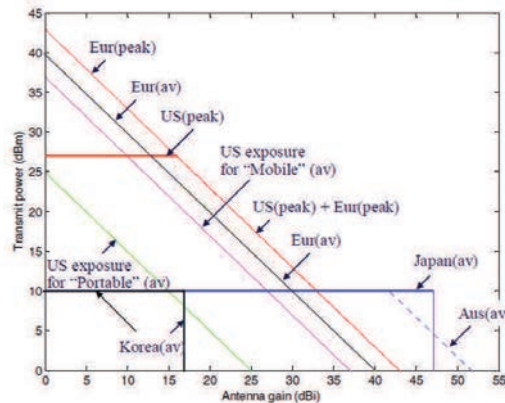


Figure II.15 - Réglementations sur la puissance limites crête et moyenne à 60 GHz en fonction du gain [21].

2.2.2. Matériaux utilisés

■ Le substrat

Nous avons fait le choix de concevoir les réseaux d'antennes imprimées 60 GHz, sur un substrat RT/Duroid 5880 [40], qui est un substrat très utilisé en bande millimétrique en raison notamment de sa faible constante diélectrique ϵ_r (Tableau II.2). De plus, c'est un matériau à faibles pertes électriques (Tableau II.2). Ce substrat est disponible chez le fabricant en plusieurs épaisseurs allant de 0,127 mm à 3,175 mm avec des métallisations de cuivre de base variant de 9 μm à 70 μm . Lors de la conception, nous nous sommes cantonnés aux épaisseurs de substrat standard disponibles chez le fabricant pour lesquelles le cuivre de base est de 17 μm (cette épaisseur est la métallisation de base la plus fine disponible dans la gamme standard).

Tableau II.2 - Caractéristiques diélectriques et thermo-physiques du RT/Duroid 5880 fournies par le fabricant [40].

Constante diélectrique ϵ_r (à 60 GHz)	Facteur de dissipation $\tan \delta$ (à 60 GHz)	Capacité thermique c (J/(kg·°C))	Conductivité thermique k (W/(m·°C))	Densité ρ (kg/m ³)
2,2	0,003	0,96	0,2	2200

■ Le fantôme équivalent

Un modèle numérique sous CST MWS du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz est utilisé pour estimer l'impact du corps humain sur les performances des réseaux d'antennes mais aussi pour évaluer les niveaux d'exposition. Les propriétés diélectriques du fantôme définies dans le modèle numérique sont tirées de [41], où un fantôme équivalent expérimental émulant le comportement électromagnétique de la peau humaine à 60 GHz est développé. Ce fantôme est un matériau semi-solide composé à majorité d'eau déionisée dont la permittivité complexe est ajustée

par la concentration de poudre de polyéthylène dans le matériau. Le détail de la composition et la procédure de fabrication de ce fantôme sont donnés en Annexe A.

Les propriétés diélectriques et thermo-physiques du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz sont données dans le Tableau II.3. La permittivité complexe est en bon accord avec les modèles diélectriques de la peau établis dans [42] et [41], avec des déviations inférieures à 10 %. En ce qui concerne les propriétés thermiques, elles sont estimées à partir de [43] et [44].

Tableau II.3 - Propriétés diélectriques et thermo-physiques du fantôme équivalent semi-solide de la peau humaine à 60 GHz [41].

Constante diélectrique ϵ_r (de 8 à 40 GHz)	Facteur de dissipation $\tan \delta$ (à 60 GHz)	Capacité thermique c (J/(kg·°C))	Conductivité thermique k (W/(m·°C))	Densité ρ (kg/m ³)
7,4	1,54	3,5	0,5	880

Dans les modèles numériques CST MWS, un fantôme planaire de forme parallélépipédique de dimensions D égales à 60 mm et d'épaisseur L égale à 1 mm est utilisé. A 60 GHz, le corps est électriquement large et la profondeur de pénétration dans les tissus est faible ce qui permet de considérer la surface du corps comme un élément à surface plane. Dans ces modèles CST MWS, le fantôme est placé sous les structures des réseaux d'antennes comme illustré en Figure II.16. Le fantôme et la face arrière du réseau sont séparés par un gap d'air h variable entre 0 et 10 mm.

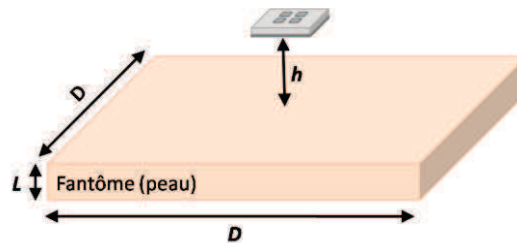


Figure II.16 - Position schématique du réseau d'antennes imprimées et du fantôme équivalent dans les modèles CST MWS.

3. Comparaison des méthodes d'alimentation de réseaux d'antennes imprimées 60 GHz

Dans cette section, plusieurs réseaux d'antennes patch sont analysés séparément puis comparés les uns aux autres. Ces réseaux sont à polarisation linéaire ; ils sont alimentés soit par une méthode directe qui est l'alimentation par ligne micro-ruban (réseau A_1), soit par une méthode indirecte qui est l'alimentation par couplage par fente dont plusieurs variantes d'arborescence d'alimentation sont considérées, à savoir une arborescence en lignes micro-ruban (réseau A_2), une arborescence en lignes triplaques (réseau A_3) et une autre en guide SIW (réseau A_4). Pour la variante en lignes triplaques, un cas supplémentaire dit blindé est aussi étudié (réseau A_{3b}). De plus, pour chaque méthode ou variante d'alimentation, un réseau d'antennes est optimisé en utilisant la technique d'élargissement de bande passante qui consiste à empiler plusieurs niveaux d'antennes patch afin de générer plusieurs fréquences de résonance (réseaux As_1 , As_2 , As_3 et As_4).

Dans les sous-sections qui suivent les structures et les géométries des différents réseaux d'antennes sont détaillées. Les performances antennaires des réseaux d'antennes en espace libre et en présence du fantôme ($h = 1$ mm) sont analysées et comparées en termes d'adaptation et de rayonnement. De plus, les niveaux d'exposition du fantôme de la peau humain sont étudiés en termes de distribution surfacique de pic de DAS ($h = 1$ mm). L'impact de l'écartement h sur les valeurs de DAS_{max} , et de puissance absorbée (P_a) par le fantôme est également analysé par chaque réseau d'antennes patch simple. Précisons que, dans cette étude, c'est le DAS qui est utilisé pour évaluer l'exposition du fantôme et non la densité de puissance incidente P_0 , car le DAS est une quantité dosimétrique plus adéquate pour interpréter et quantifier l'exposition dans un volume de tissus ou de fantôme.

3.1. Structures et géométries des réseaux d'antennes

Dans cette sous-section les structures de chaque réseau d'antennes 2×2 éléments 60 GHz sont présentées et comparées en termes de nombre et d'épaisseur de couches de substrat, d'écartement centre-à-centre entre éléments rayonnants s , ainsi que de géométrie de l'arborescence d'alimentation. Par chaque méthode ou variante d'alimentation, les structures des réseaux d'antennes utilisant ou non la méthode d'élargissement de bande passante sont présentées en détail et le choix de l'architecture d'alimentation est justifié

3.1.1. Réseaux d'antennes alimentées par lignes micro-rubans : A_1 et As_1

▪ Réseau d'antennes patch simple A_1

La structure du réseau A_1 (Figure II.17a) est une structure monocouche composée d'une couche de substrat Sub_1 d'épaisseur 0,127 mm et de deux niveaux métallisations en cuivre m_1 et m_2 . Sur le niveau m_1 se trouvent un réseau 2×2 d'antennes imprimées rectangulaires ainsi que leurs arborescences d'alimentation micro-ruban. Le niveau m_2 est un plan de masse réflecteur aux dimensions finies égales à celles du substrat. La présence des lignes d'alimentation micro-ruban sur le niveau m_1 , impose des écarts s supérieurs à $\lambda_0/2$ à 60 GHz ($s = 3,7$ mm soit $0,74 \times \lambda_0$ à 60 GHz). Cependant, le respect de l'écart $\lambda_0/2$ à une fréquence donnée permet d'éviter l'apparition de lobes de réseau sur le diagramme de rayonnement à cette même fréquence.

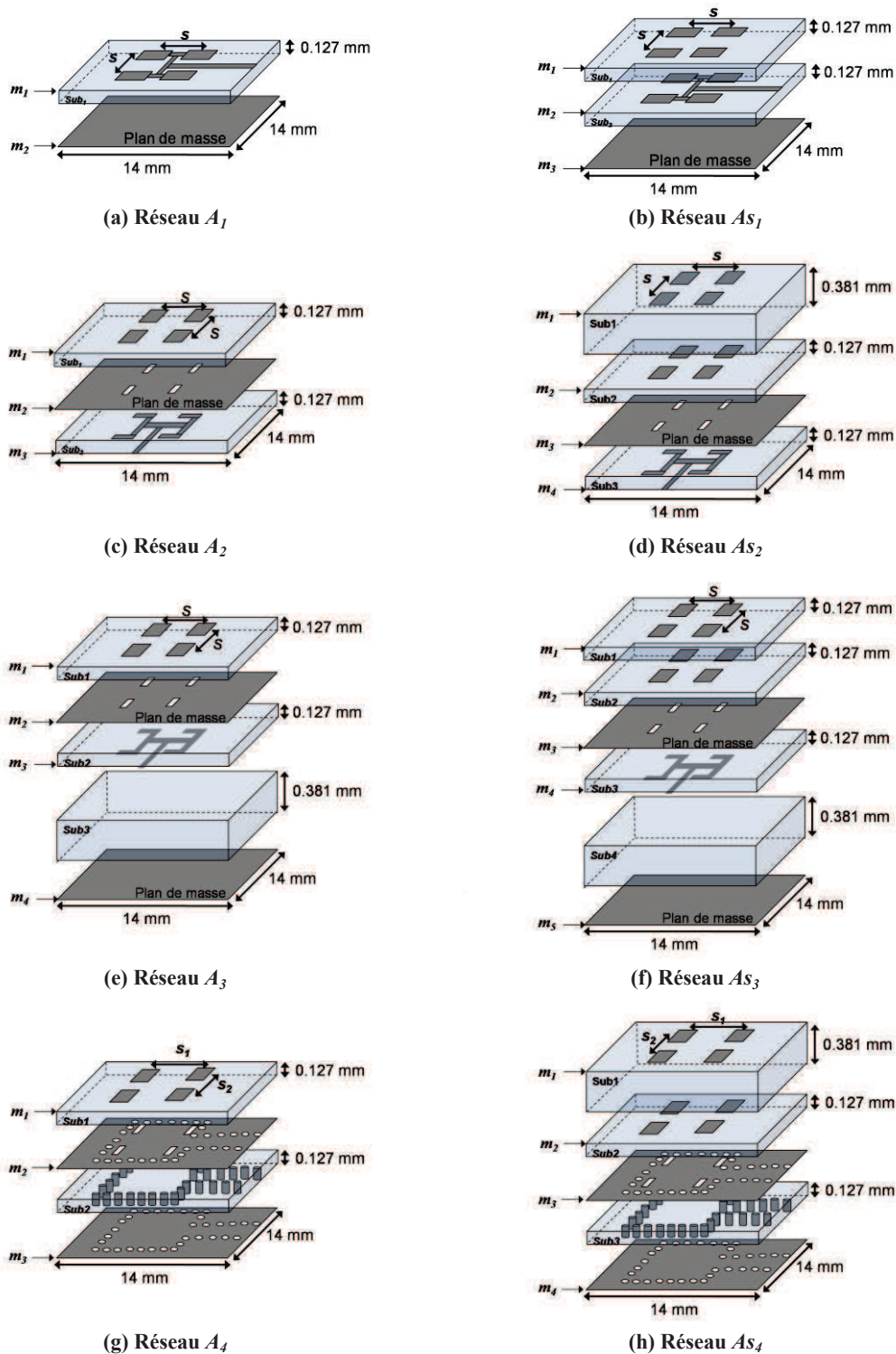


Figure II.17 - Schémas en vue éclatée des structures des différents réseaux d'antennes étudiés.

▪ Réseau d'antennes patch empilés As_1

Le réseau As_1 (Figure II.17b), possède lui une structure multicouche, composée de deux couches de substrat Sub_1 et Sub_2 d'épaisseur 0,127 mm chacune et de trois niveaux de métallisation m_1 , m_2 et m_3 . Sur m_1 se trouvent 2×2 antennes rectangulaires dites « empilées ». Leurs dimensions sont optimisées pour faire en sorte que la fréquence de résonance soit légèrement différente de celle des antennes dites « enterrées », gravées sur le niveau m_2 de la structure. Les géométries sur le niveau m_2 sont semblables à celles sur le niveau m_1 de réseau A_1 .

▪ Arborescence d'alimentation 2×2

L'arborescence micro-ruban de ces réseaux d'antennes est inspirée du réseau de 2×2 antennes patchs rectangulaires est présenté dans [22]. Cette arborescence est constituée de trois diviseurs de puissance un vers deux. Le gain typique d'une antenne patch rectangulaire est autour de 6 dBi, la mise en réseau 2×2 permet d'atteindre un gain de l'ordre de 12 dBi avec une ouverture de faisceau semblable dans les plans E et H, et un rayonnement maximal dans le plan perpendiculaire à la surface du réseau d'antennes.

3.1.2. Réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées avec une arborescence d'alimentation en lignes micro-rubans A_2 et As_2

▪ Réseau d'antennes patch simple A_2

Le réseau A_2 possède une structure composée de deux couches de substrat Sub_1 et Sub_2 , toutes deux d'épaisseur 0,127 mm, ainsi que trois niveaux de métallisation m_1 , m_2 et m_3 . Sur la couche m_1 sont imprimées les antennes patchs rectangulaires optimisées à 60 GHz ; la couche m_2 est un plan de masse de dimensions finies identiques à celles du substrat, dans lequel sont gravées les fentes permettant d'alimenter par couplage les antennes ; sur la couche m_3 est imprimée l'arborescence d'alimentation en lignes micro-rubans (Figure II.17c).

▪ Réseau d'antennes patch empilés As_2

Le réseau As_2 est lui composé de trois couches de substrat Sub_1 , Sub_2 et Sub_3 , ainsi que de quatre niveaux de métallisation en cuivre m_1 , m_2 , m_3 et m_4 (Figure II.17d). Si Sub_2 et Sub_3 sont de fines couches de substrat d'épaisseur 0,127 mm, la couche Sub_1 est en revanche plus épaisse et atteint 0,381 mm. En ce qui concerne les niveaux de métallisation, sur le niveau m_1 sont gravés les antennes « empilées » dont la fréquence de résonance est légèrement décalée de celles des antennes « enterrées » gravées sur le niveau m_2 , le niveau de métallisation m_3 est un plan de masse dans lequel sont gravées les fentes d'alimentation par couplage et sur le niveau m_4 est gravée une arborescence de lignes micro-rubans.

▪ Arborescence d'alimentation 2×2

La difficulté de conception des réseaux d'antennes imprimées A_2 et As_2 réside dans le choix de l'architecture de l'arborescence d'alimentation 2×2 éléments. En effet, on trouve dans la littérature plusieurs architectures d'arborescence possibles pour alimenter un réseau d'antennes 2×2 éléments excitées par fentes couplées. Il existe des arborescences où les éléments sont alignés (Figure II.18a) suivant un même axe comme dans [45] [46]. Ce type d'arborescence accroit

l'encombrement des réseaux et réduit l'ouverture du diagramme de rayonnement, ce qui est contraire aux caractéristiques recherchées pour les antennes *off-body*. Une autre solution d'arborescence est l'alimentation série [47] illustrée en Figure II.18b, elle est composée de seulement un diviseur de puissance un vers deux qui alimente deux branches qui excitent par couplage le réseau de fentes 2×2 . Cependant l'inconvénient de cette solution est un écart λ_0 imposé entre les fentes placées sur une même branche pour éviter un déphasage entre les fentes, qui risque de générer l'apparition de lobes de réseau. Les solutions (Figure II.18c) et (Figure II.18d) où l'arborescence d'alimentation possède un diviseur de puissance principal centré entre les fentes permettent elles de conserver des écartements s de $\lambda_0/2$. Cependant, avec la solution Figure II.18c, le sens des courants électriques entre les fentes d'une même branche est inversé, induisant un zéro de rayonnement dans la direction perpendiculaire au plan des antennes, pour revenir en phase l'ajout d'un tronçon $\lambda_g/2$ est nécessaire. La solution d'arborescence retenue pour les réseaux A_2 et As_2 est donc celle illustrée en Figure II.18d où (1) le sens des courants électriques est identique pour toutes les fentes et où (2) l'écartement maximal entre les centres des fentes peut être maintenu à $\lambda_0/2$, (3) minimisant du même coup l'encombrement.

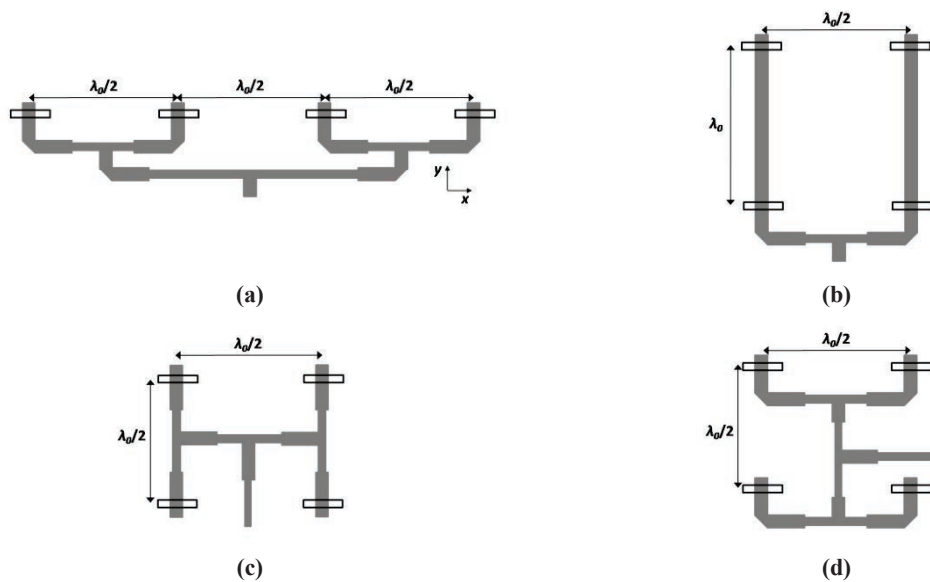


Figure II.18 - Architectures d'excitation possibles pour des réseaux d'antennes 2×2 éléments.

3.1.3. Réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées excitées par lignes triplaques : A_3 , A_{3b} et As_3

■ Réseau d'antennes patch simple A_3 (ou A_{3b})

Le réseau A_3 est composé de trois couches de substrat Sub_1 et Sub_2 d'épaisseur 0,127 mm, et Sub_3 d'épaisseur de 0,381 mm, ainsi que de quatre niveaux de métallisation m_1 , m_2 , m_3 et m_4 (Figure II.17e). Sur le niveau m_1 sont gravées les 2×2 antennes dont l'écart centre à centre s est égale à $\lambda_0/2$ à 60 GHz (2,5 mm) ; le niveau m_2 est un plan de masse dans lequel sont gravées les fentes permettant d'alimenter par couplage les antennes ; sur le niveau m_3 sont imprimées les lignes triplaques qui vont servir à exciter les fentes du niveau m_2 ; les lignes triplaques forment une arborescence semblable à la solution 4 retenue pour les réseaux A_2 et As_2 (Figure II.18d) ; et le niveau m_4 est un plan de masse aux dimensions finies équivalentes à celles du substrat isolant l'arborescence d'alimentation.

▪ Réseau d'antennes patch empilés As_3

Le réseau As_3 est composé de quatre couches de substrat Sub_1 , Sub_2 et Sub_3 d'épaisseur 0,127 mm et Sub_4 d'épaisseur 0,381 mm (Figure II.17f). Ce réseau comporte cinq niveaux de métallisation : le niveau m_1 sur lequel sont imprimées les antennes « empilées » ; le niveau m_2 où se trouvent les antennes imprimées « enterrées » ; le niveau m_3 qui est le plan de masse dans lequel ont été gravées les fentes d'alimentation ; le niveau m_4 où est imprimé l'arborescence d'alimentation triplaques ; et le niveau m_5 qui est le plan de masse réflecteur isolant l'arborescence d'alimentation.

▪ Arborescence d'alimentation 2×2

Les réseaux d'antennes A_3 et As_3 sont optimisés avec des structures triplaques asymétriques. Pour favoriser le couplage entre les fentes et l'arborescence d'alimentation, il est préférable que la couche de substrat se trouvant entre les fentes et les lignes triplaques soit plus fine, généralement un substrat avec une constante diélectrique plus élevée est aussi privilégié [48]. Des via métallisés traversant les couches des structures entre m_2 et m_4 pour le réseau A_3 ou bien m_3 et m_5 pour le réseau As_3 sont placés autour des fentes (Figure II.19) pour éviter la propagation de modes parasites entre les deux plans métalliques de la structure triplaque, lesquels risqueraient d'engendrer un décalage de la ou des fréquence(s) de résonance ainsi qu'une déformation du diagramme de rayonnement du réseau d'antennes [48].

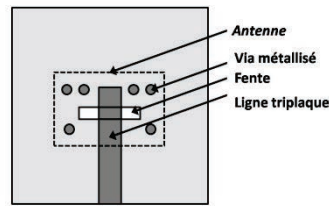


Figure II.19 -Illustration schématique en vue de dessous de la position des via métallisés entre les deux plans de masse de la structure triplaque.

3.1.4. Réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées excitées par une cavité SIW : A_4 et As_4

▪ Réseau d'antennes patch simple A_4

Le réseau A_4 (Figure II.17g) est composé de deux couches de substrat Sub_1 et Sub_2 d'épaisseur 0,127 mm et de trois niveaux de métallisation : le niveau m_1 sur lequel sont imprimées les 2×2 antennes patchs rectangulaires ; le niveau m_2 est le plan de masse où sont gravées les fentes permettant d'alimenter les antennes ; le niveau m_3 un plan de masse plein de dimensions finies. L'arborescence d'excitation SIW est située entre la couche m_2 et m_3 de la structure, elle est composée de lignes de via métallisés traversant l'épaisseur du substrat Sub_2 .

▪ Réseau d'antennes patch empilés As_4

Le réseau As_4 (Figure II.17h) est constitué de trois couches de substrat Sub_1 , Sub_2 et Sub_3 et de quatre niveaux de métallisation. De la couche m_2 à la couche m_4 de la structure du réseau As_4 on retrouve la même organisation que pour la structure du réseau A_4 . La couche de substrat supplémentaire Sub_1 est plus épaisse (0,381 mm) que les autres couches de la structure, et le niveau de métallisation m_1 est constitué des 2×2 antennes « empilées ».

▪ Arborescence d'alimentation 2×2

Les structures des réseaux A_4 et As_4 illustrées en Figure II.17g et Figure II.17h ont l'avantage d'être moins encombrantes en termes d'épaisseur que celles des réseaux A_3 et As_3 , en revanche les écartements entre les éléments rayonnants sont supérieurs $\lambda_0/2$ à 60 GHz. En effet, l'écartement s_1 est de λ_g (la longueur d'onde dans le substrat à 60 GHz) égal à 3,37 mm, alors que s_2 est maintenu à 2,5 mm (soit $\lambda_0/2$ à 60 GHz). La valeur imposée de s_1 permet d'éviter un déphasage entre les fentes. Elle s'explique par le choix de l'architecture de l'arborescence d'alimentation effectué, car, comme pour les réseaux d'antennes précédents, le choix de l'architecture est fondamental pour l'encombrement et les performances des réseaux A_4 et As_4 . Plusieurs possibilités d'architecture en technologie SIW existent pour une arborescence 2×2 et sont illustrées en Figure II.20. La première est une architecture simple, où les fentes sont placées au dessus d'une cavité SIW (Figure II.20a), c'est donc l'architecture que nous avons choisie. La seconde est une architecture en forme de H (Figure II.20b), un des problèmes de cette architecture est l'apparition de courants inverses autour des fentes situées sur un même bras du H, qui engendre un zéro de rayonnement dans le plan perpendiculaire à la surface du réseau d'antennes, là où un rayonnement maximal est souhaité pour les communications *off-body*. La troisième et dernière architecture est une arborescence en branches (Figure II.20c).

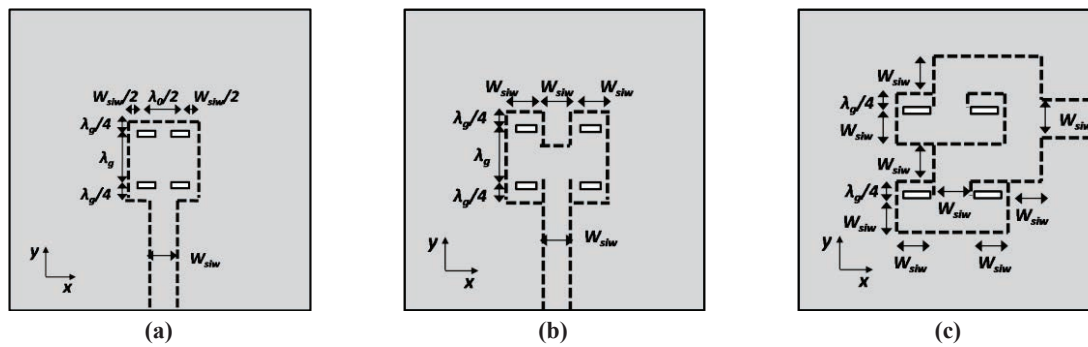


Figure II.20 - Illustrations des architectures en technologie SIW possible pour le réseau d'alimentation des réseaux d'antennes 2×2 éléments rayonnants à 60 GHz : (a) en forme de cavité, (b) en H, et (c) en branche.

Un paramètre essentiel à l'encombrement des architectures illustrées Figure II.20, est la largeur minimale du guide d'onde intégré au substrat W_{siw} , dont dépend la fréquence de coupure du guide qui doit être 15 % à 20 % inférieure à la fréquence basse de la bande d'intérêt à savoir la bande 57 - 66 GHz. Pour déterminer, la valeur de W_{siw} , on utilise la formule reliant la fréquence de coupure f_c d'un guide d'onde à ses dimensions a et b (largeur et hauteur respectivement), aux caractéristiques électromagnétiques de l'intérieur du guide ε et μ (permittivité et perméabilité du substrat respectivement), ainsi qu'aux indices m et n du mode propagé dans le guide :

$$f_c = \frac{2}{2\sqrt{\mu\varepsilon}} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2} \quad (2)$$

A partir de cette formule il est possible de déterminer approximativement la largeur minimale du guide d'onde W_{siw} pour que seul le mode TE₁₀ se propage, en respectant un écart inférieur de 15 à 20 % entre la fréquence de coupure f_c et la fréquence basse de la bande d'intérêt, c'est-à-dire 57 GHz. Pour la permittivité du substrat RT/duroid 5880 la valeur de W_{siw} est comprise entre 2,15 mm \pm 0,05 mm. Ce qui permet de calculer les encombrements suivant x et y donnés dans Tableau II.4. Ce tableau montre que l'architecture limitant l'encombrement est celle en forme de cavité

(Figure II.20a), de plus elle permet aussi de conserver au moins un des écartements s à $\lambda_0/2$, ce qui n'est le cas d'aucune des autres possibilités d'architecture.

Tableau II.4 - Encombrement relatif à chaque d'architectures d'alimentation 2×2 éléments en technologie SIW.

Arborescences	Encombrement (mm)		Ecartements (mm)	
	x	y	s_1	s_2
<i>En cavité</i>	4,65	5,06	3,37	2,50
<i>En H</i>	6,45	5,06	3,37	4,30
<i>En branche</i>	8,60	10,285	5,14	4,30

3.1.5. Bilan

Les points importants mis en évidence par les analyses effectuées des structures et dimensions de chaque réseau d'antennes 2×2 éléments sont résumés dans le Tableau II.5 en termes de nombre de couches, d'épaisseur, et de dimensions des structures, ainsi que d'écart entre éléments rayonnements.

La comparaison des données présentées dans le Tableau II.5 met en avant que le réseau A_1 est celui dont la complexité de réalisation est la moins élevée du fait d'une structure monocouche, en revanche le réseau As_3 est lui le réseau plus complexe à réaliser en raison de sa structure composée de quatre couches de substrat dont les épaisseurs ne sont pas toutes identiques. Ce nombre de couches le rend aussi plus encombrant en termes d'épaisseur 0,813 mm contre 0,161 mm pour le réseau A_1 . Les réseaux As_1 , A_2 , As_2 , A_3 , A_4 et As_4 possèdent des structures multicouches composées soit de deux ou bien de trois couches de substrat amenant à des épaisseurs comprises entre 0,288 mm et 0,686 mm. En ce qui concerne les dimensions des planches de substrat utilisées dans les structures elles possèdent toutes des dimensions identiques quel que soit le réseau, égale à 14 mm limitant ainsi l'encombrement.

Pour éviter l'apparition de lobe de réseau, les écarts s ne doivent pas dépasser $\lambda_0/2$, soit à 60 GHz la valeur de 2,5 mm. Ce n'est pas le cas pour les réseaux A_1 et As_1 où les écartements sont de 3,7 mm en raison de la présence de l'arborescence d'alimentation sur le même niveau que les antennes, ni pour les réseaux A_4 et As_4 où seul s_1 est supérieur à $\lambda_0/2$ du fait du choix de l'architecture SIW qui impose un écartement λ_g entre les fentes suivant y pour éviter un déphasage.

Tableau II.5 - Récapitulatif des spécifications des structures et des dimensions des réseaux d'antennes 2×2 comparés.

Réseaux d'antennes	Nombre de couche	Epaisseur (mm)	Dimensions (mm)	Ecarts s_1 / s_2 (mm)
A_1	1	0,161	14×14	3,7 / 3,7
As_1	2	0,288	14×14	3,7 / 3,7
A_2	2	0,288	14×14	2,5 / 2,5
As_2	3	0,686	14×14	2,5 / 2,5
A_3	3	0,686	14×14	2,5 / 2,5
As_3	4	0,813	14×14	2,5 / 2,5
A_4	2	0,288	14×14	3,37 / 2,5
As_4	3	0,686	14×14	3,37 / 2,5

3.2. Adaptation sur la bande 60 GHz

Les réseaux d'antennes patch simple (A_1 , A_2 , A_3 et A_4) et patch empilés (As_1 , As_2 , As_3 et As_4) sont étudiés en espace libre ($h \rightarrow \infty$) et en présence du fantôme équivalent pour différents écartements h . Pour chaque réseau, la largeur de la bande de fréquence sur laquelle le coefficient de réflexion S_{11} est inférieur à -10 dB est précisée ; de plus l'élargissement de bande passante générée par les réseaux d'antennes empilés est analysé pour chaque méthode d'alimentation, ainsi que la qualité de la couverture de la bande des 60 GHz.

3.2.1. Réseaux d'antennes alimentées par lignes micro-rubans : A_1 et As_1

- **Largeur de bande passante et couverture de la bande 60 GHz**

Le module du coefficient de réflexion du réseau d'antennes imprimées A_1 est inférieur à -10 dB sur la bande de fréquence 58,7 - 61,6 GHz (Figure II.21a), soit une bande passante de 2,9 GHz (4,8 %). Comme attendu la bande passante du réseau A_1 est relativement étroite en comparaison à la bande fréquence disponible à 60 GHz.

Pour le réseau As_1 , la bande passante est plus large, elle est comprise entre 55,3 et 65 GHz (Figure II.21b), soit 9,7 GHz (16,2 %). Cette fois le réseau est adapté sur l'ensemble de la bande 57 - 64 GHz et sur la quasi-totalité de la bande européenne (57 - 66 GHz). Les fréquences de résonance des deux niveaux d'antennes patch sont situées autour de 57 GHz et 60 GHz. Ces fréquences sont suffisamment proches pour éviter une remontée du niveau de coefficient de réflexion au dessus de -10 dB entre ces deux fréquences.

- **Impact de la présence du fantôme de la peau humaine ($h = 1$ mm)**

L'adaptation des réseaux A_1 et As_1 est quasi-stable en présence du fantôme équivalent (Figure II.21a et Figure II.21b) et cela quelque soit l'écartement h entre le fantôme et le réseau d'antenne. Dans le cas du réseau A_1 , un décalage maximal de la bande passante de 220 MHz vers les hautes fréquences est observé. Dans le cas du réseau As_1 , c'est un décalage semblable de 300 MHz qui est mesuré. Les largeurs de bandes passantes sont équivalentes en présence du fantôme équivalent à celles relevées en espace libre.

3.2.2. Réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées avec une arborescence d'alimentation en lignes micro-ruban : A_2 et As_2

- **Largeur de bande passante et couverture de la bande 60 GHz**

Le réseau d'antennes imprimées A_2 est adapté sur une bande de fréquence étroite par rapport à la bande de fréquence disponible à 60 GHz, comprise entre 58,6 GHz et 61,3 GHz soit 2,7 GHz de bande passante (4,5 %) (Figure II.21c).

Le réseau d'antenne As_2 possède lui une bande comprise entre 54,2 GHz et au moins 70 GHz soit 15,8 GHz (bande passante relative à 26,3 %) (Figure II.21d), ce qui signifie que le réseau couvre la totalité du spectre de la bande de fréquence libre entourant 60 GHz.

- **Impact de la présence du fantôme de la peau humaine ($h = 1$ mm)**

La présence du fantôme affecte l'adaptation des réseaux A_2 et As_2 (Figure II.21c). En cas de contact de la structure du réseau d'antennes avec la surface du fantôme ($h = 0$ mm), le réseau A_2 est même complètement désadapté sur toute la bande 60 GHz. En présence du fantôme le coefficient de réflexion S_{11} du réseau As_2 a tendance à se dégrader aux niveaux des fréquences de résonance des antennes patch, à savoir environ 56 GHz et 62 GHz (Figure II.21d).

3.2.3. Réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées excitées par lignes triplaques : A_3 , A_{3b} et As_3

- **Largeur de bande passante et couverture de la bande 60 GHz**

Le réseau d'antennes A_3 (ou A_{3b}) est adapté en espace libre sur une bande de fréquences étroite large de 2,5 GHz (4,2 %) comprise entre 58,5 et 61 GHz (Figure II.21e).

Pour le réseau As_3 (Figure II.21f), deux fréquences de résonance sont remarquables à 57,7 GHz et à 62,5 GHz. Le réseau est adapté sur la bande de fréquence 52,5 - 65,9 GHz soit 13,4 GHz de bande passante (22,3 %). Cette couverture englobe la quasi-totalité de la bande 60 GHz européenne.

- **Impact de la présence du fantôme de la peau humaine ($h = 1$ mm)**

La présence du fantôme a un impact très négligeable sur le coefficient de réflexion S_{11} des réseaux A_3 et As_3 . La Figure II.21e montre que même en cas de contact de la face arrière de la structure du réseau A_3 avec le fantôme ($h = 0$ mm), le comportement de la courbe du module S_{11} est presque parfaitement superposé à celui en espace libre ($h = \infty$).

3.2.4. Réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées excitées par une cavité SIW : A_4 et As_4

- **Largeur de bande passante et couverture de la bande 60 GHz**

Le coefficient de réflexion du réseau d'antennes imprimées A_4 est inférieur à - 10 dB sur la bande 59,1 - 61,3 GHz (Figure II.21g), soit une bande passante de 2,2 GHz (3,7 %) ; comme attendue la bande passante du réseau A_4 est étroite.

La bande passante du réseau As_4 s'étale elle sur la large bande de fréquences 53,8 - 67,7 GHz (Figure II.21h), soit 13,9 GHz (23,2 %), ce réseau est donc adapté sur l'ensemble de la bande nord américaine (57-64 GHz) et de la bande européenne (57-66 GHz). On distingue clairement les fréquences de résonance des deux niveaux d'antennes patch autour de 57,8 GHz et 65,6 GHz.

- **Impact de la présence du fantôme de la peau humaine ($h = 1$ mm)**

L'adaptation des réseaux A_4 et As_4 est insensible à la présence du fantôme équivalent et cela même en cas de contact de la face arrière ($h = 0$ mm). En effet, la Figure II.21g montre une superposition parfaite des courbes pour $h = 0$ mm et $h = \infty$.

3.2.5. Bilan

Le Tableau II.6 résume les fréquences limites des bandes passantes ainsi que les largeurs des bandes passantes relatives des différents réseaux d'antennes patch analysés et comparés. Ce tableau souligne le fait que sans l'utilisation de la technique d'élargissement de bande passante dite des antennes empilées, les bandes passantes des réseaux d'antennes patches 2×2 éléments sont faibles en comparaison de la bande 60 GHz disponible avec des bandes relatives comprises entre 3,7 % et 4,8 %. Les structures empilées permettent d'obtenir des bandes atteignant 16,2 % à 26,7 %, lesquelles couvrent la totalité ou la quasi-totalité de la bande 57 - 66 GHz selon les réseaux étudiés.

Tableau II.6 - Fréquences délimitant la bande passante de chaque réseau d'antennes analysé et valeur de la bande passante relative à 60 GHz.

Réseaux d'antennes	Fréquence basse (GHz)	Fréquence haute (GHz)	Bande passante relative (%)
A_1	58,7	61,6	4,8
As_1	55,3	65	16,2
A_2	58,6	61,3	4,5
As_2	54	70	26,7
A_3	58,5	61	4,2
As_3	52,4	65,9	22,5
A_4	59,1	61,3	3,7
As_4	53,8	67,8	23,3

D'autres observations qui ne sont pas mises en évidence dans ce Tableau II.6, concernent la stabilité de l'adaptation des réseaux d'antennes en présence du fantôme équivalent. Dans le cas du réseau A_1 ou As_1 , l'adaptation est quasi-stable quel que soit l'écartement h entre la face arrière des structures antennaires et la surface exposée du fantôme équivalent, des décalages de seulement 0,22 GHz ou 0,30 GHz sont relevés pour $h = 0$ mm. En ce qui concerne les réseaux A_2 ou As_2 , ils sont en revanche très affectés par la présence du fantôme, jusqu'à être complètement désadaptés en cas de contact ($h = 0$ mm). L'adaptation des réseaux A_3 , As_3 , A_4 et As_4 peut être considérée comme insensible à la présence du fantôme équivalent, et cela même en cas de contact de la face arrière avec la surface du fantôme équivalent.

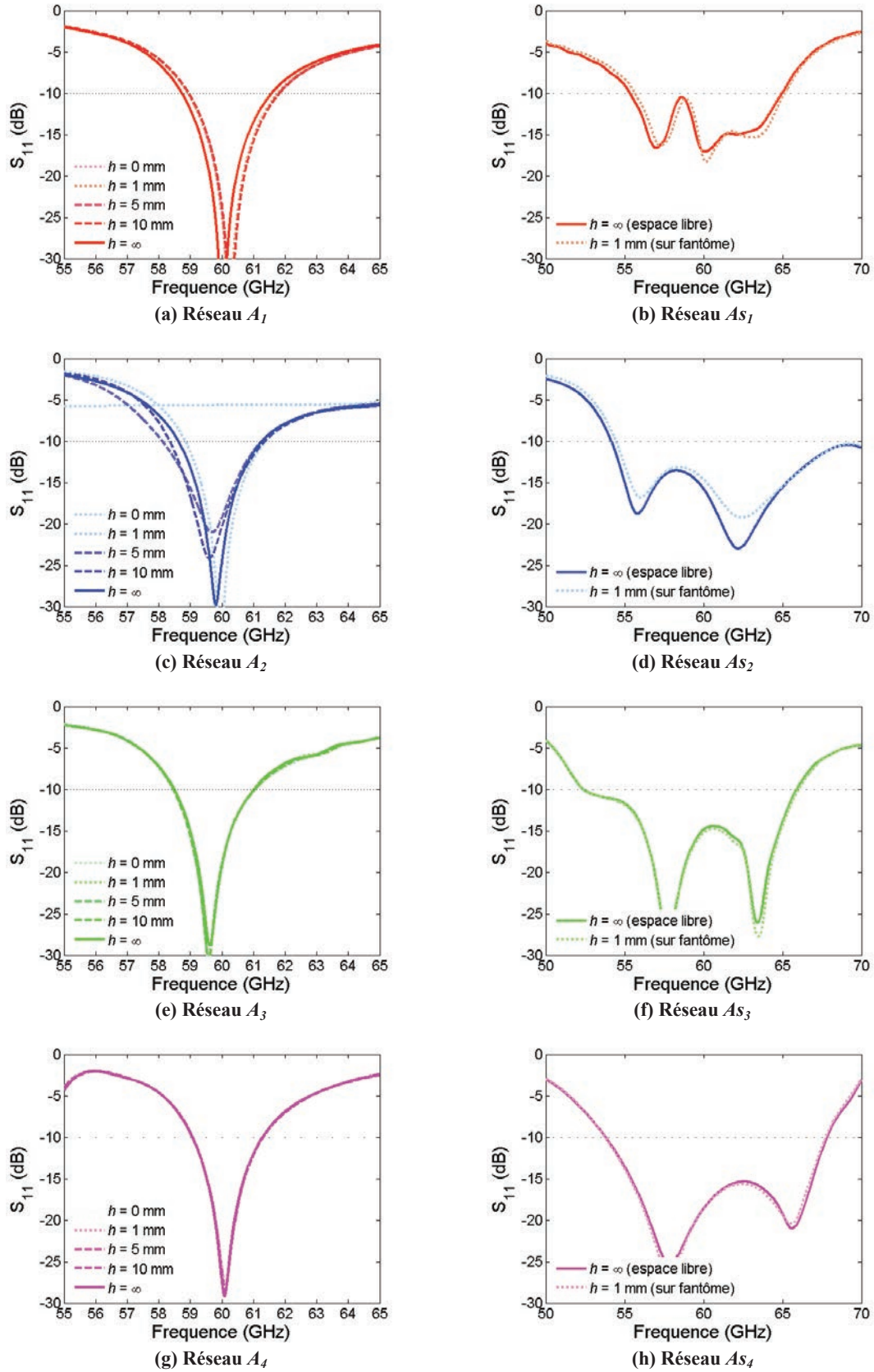


Figure II.21 - Module du coefficient de réflexion des différents réseaux d'antennes en espace libre et en présence du fantôme de la peau humaine autour de 60 GHz.

3.3. Performances en rayonnement à 60 GHz

Les performances en rayonnement des réseaux d'antennes sont données en Figure II.22 et Figure II.23. La Figure II.22 présente les digrammes de rayonnement 3D à 60 GHz ainsi que les diagrammes de rayonnement polaires dans les plans E et H entre 59 et 61 GHz en espace libre et pour chaque réseau d'antenne. La Figure II.23 compare les gains des réseaux sur la bande 59-61 GHz et les diagrammes de rayonnements polaires dans les plans E et H à 60 GHz en espace libre à ceux en présence du fantôme équivalent distant de $h = 1$ mm.

Dans cette sous-section, les performances de rayonnement des différents réseaux d'antennes (A_1 , A_2 , A_3 , A_{3b} et A_4) sont comparées en termes d'ouverture du lobe de rayonnement principal à -3 dB, de présence ou non de lobes de réseau, d'amplitude de rayonnement arrière, et de performance de rayonnement (directivité et gain). Un bilan des performances de rayonnant est effectué pour mettre en évidence les particularités liées à chacune des variantes d'alimentation des antennes. Précisons que les réseaux d'antennes comparés possèdent tous des structures aux dimensions finies $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$

3.3.1. Réseau d'antennes alimentées par lignes micro-ruban : A_1

- **Stabilité du rayonnement sur la bande 59-61 GHz**

Les diagrammes de rayonnements polaires dans les plans E et H du réseau d'antennes A_1 sur la bande 59-61 GHz, sont présentés en Figure II.22a. La forme du lobe de rayonnement principal est globalement stable sur la bande de fréquence. Cependant il est important de préciser que l'amplitude des lobes de rayonnement secondaire a tendance à croître avec la fréquence. Dans le plan H par exemple le niveau maximal de rayonnement des lobes secondaires est de l'ordre de -20 dB à 59 GHz et passe à -17 dB à 61 GHz.

- **Ouverture à - 3 dB**

Le réseau A_1 génère un diagramme de rayonnement avec de larges ouvertures à - 3 dB dans les plans E et H à 60 GHz, respectivement 44° et 32° en espace libre, et 46° et 36° en présence du fantôme équivalent (Figure II.23a (ii) et (iii)).

- **Lobes secondaires de rayonnement**

Des lobes secondaires de rayonnement sont présents dans les plans E et H du diagramme de rayonnement du réseau A_1 à 60 GHz (Figure II.23a (ii) et (iii)). Ces lobes sont liés au fait que les écarts s sont supérieurs à $\lambda_0/2$ à 60 GHz (3,7 mm soit $0,74 \cdot \lambda_0$ à 60 GHz). L'écart minimal entre les lobes secondaires et le lobe de rayonnement principal est de - 8 dB dans le plan E et de -17 dB dans le plan H. Ces écarts sont peu affectés lorsque que le réseau est mis en présence du fantôme de la peau.

- **Rayonnement arrière**

L'impact principal de la présence du fantôme se fait ressentir au niveau du rayonnement arrière du réseau d'antennes A_1 . En effet, l'écart entre le niveau de rayonnement arrière à 180° et de

rayonnement principal à 0° est de -23 dB en espace libre, et il passe à une valeur de l'ordre de -30 dB en présence du fantôme.

▪ **Gains et directivités**

Lorsque que le réseau A_1 est mis en présence du fantôme, les valeurs de directivité et le gain ont légèrement tendance à augmenter en raison des réflexions en surface du fantôme. Si l'on compare les valeur en espace libre où la directivité est de 13,3 dBi et le gain de 12,4 dB, à celles en présence du fantôme où les valeurs atteignent respectivement 13,5 dBi et 12,5 dB, une augmentation de l'ordre de 1,5 % est observé pour la directivité et de 0,8 % pour le gain.

3.3.2. Réseau d'antennes alimentées par fentes couplées avec une arborescence d'alimentation en lignes micro-ruban : A_2

▪ **Stabilité du rayonnement sur la bande 59-61 GHz**

Les diagrammes de rayonnement du réseau d'antenne A_2 sur la bande de fréquence 59-61 GHz sont superposés dans les plans E et H en Figure II.22b. Une bonne superposition des diagrammes de rayonnement est observable pour le lobe principal de rayonnement, en revanche, le niveau des lobes arrière à tendance à légèrement diminuer sur la bande. En effet, à 59 GHz le niveau de rayonnement du lobe arrière peut atteindre jusqu'à -5 dB, alors qu'à 60 GHz il est de l'ordre de -8 dB.

▪ **Ouverture à - 3 dB**

Les diagrammes du réseau A_2 à 60 GHz présentés en (Figure II.23b (ii) et (iii)) mettent en avant la large ouverture du faisceau, avec respectivement dans les plans E et H 53° et 48° d'ouverture en présence ou non du fantôme équivalent.

▪ **Lobes secondaires de rayonnement**

Contrairement aux diagrammes du réseau A_1 et comme atténué en raison du maintien des écartements s à une valeur à 60 GHz égale à $\lambda_0/2$, on ne distingue pas de lobes secondaires (Figure II.23b).

▪ **Rayonnement arrière**

L'absence d'un plan de masse réflecteur en face arrière de la structure antennaire du réseau A_2 , est à l'origine de niveaux de rayonnement arrière élevés en espace libre (Figure II.23b) en comparaison à celui du réseau A_1 (Figure II.23a). L'écart entre l'amplitude du lobe de rayonnement arrière (à 180°) et le lobe principal (à 0°) est seulement de -7 dB pour le réseau A_2 alors qu'il est de -23 dB pour le réseau A_1 . Ce fort rayonnement arrière est induit par le rayonnement des lignes micro-rubans gravées sur la face arrière du réseau (niveau m_3) ainsi que par celui des fentes (niveau m_2). De plus le rayonnement arrière est très fortement impacté par la présence du fantôme, qui provoque une augmentation de l'écart entre le lobe arrière et le lobe principal atteignant -38 dB.

- **Gains et directivités**

Le gain et la directivité du réseau A_2 , ont comme dans le cas du réseau A_1 tendance à augmenter en présence du fantôme, sauf que dans le cas de A_2 les augmentations sont plus importantes. En effet, en espace libre la directivité et le gain du réseau d'antennes à 60 GHz sont respectivement de 10,5 dBi et 9,7 dBi, en présence du fantôme les valeurs grimpent à 11,6 dBi (+ 10 %) et à 10,2 dB (+ 5 %).

3.3.3. Réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées excitées par lignes triplaques : A_3 et A_{3b}

- **Stabilité du rayonnement sur la bande 59-61 GHz**

Les formes des diagrammes de rayonnement du réseau d'antennes A_3 dans les plans E et H sur la bande 59-61 GHz sont présentées en Figure II.22c. Même si les formes restent globalement semblables, des différences de niveau sont observables sur les lobes de rayonnement arrière. Ces différences sont difficilement interprétables en raison des très faibles niveaux de rayonnement arrière. En revanche dans le cas du réseau A_{3b} (Figure II.22d), l'accord entre les niveaux est meilleur en ce qui concerne son rayonnement arrière quel que soit le plan du diagramme.

- **Ouverture à - 3 dB**

Les diagrammes de rayonnement des réseaux A_3 (Figure II.23c) et A_{3b} (Figure II.23d) montrent que, quel que soit le réseau, le lobe principal possède une largeur d'ouverture à -3 dB avec respectivement de 44° dans le plan E et 46° dans le plan H pour le réseau A_3 , et de 54° et 48° dans les plans E et H pour le réseau A_{3b} .

- **Lobes secondaires de rayonnement**

Identiquement aux diagrammes obtenus pour le réseau d'antennes A_2 , ceux des réseaux A_3 et A_{3b} (Figure II.23c et Figure II.23d) ne présentent pas de lobes secondaires marqués. Cette absence de lobes secondaires s'explique aussi ici par le fait que les écarts inter-antennes sont maintenus à $\lambda_0/2$ à 60 GHz.

- **Rayonnement arrière**

Le rayonnement arrière des réseaux A_3 et A_{3b} est faible. Les écarts relevés entre le niveau du lobe de rayonnement arrière à 180 ° et le lobe principal à 0° des réseaux A_3 et A_{3b} , sont respectivement de l'ordre de - 29 dB et de - 26 dB en espace libre. En présence du fantôme les écarts sont de l'ordre de - 37 dB pour le réseau A_3 et de - 41 dB pour le réseau A_{3b} .

- **Gains et directivités**

La directivité et le gain en espace libre des ces réseau d'antennes 60 GHz sont conformes à ceux exigés pour les communications *off-body* avec des directivités de 11,9 dBi et 11,4 dBi, et des gains de 10,9 dB et 10,4 dB respectivement pour les réseaux A_3 et A_{3b} . Ces valeurs sont quasi-stables en présence du fantôme de la peau.

3.3.4. Réseau d'antennes alimentées par fentes couplées excitées par une cavité SIW : A_4

- **Stabilité du rayonnement sur la bande 59-61 GHz**

La superposition des diagrammes de rayonnements polaires du réseau A_4 dans les plans E et H sur la bande 59-61 GHz montre un bon accord. En effet, les variations de niveaux de rayonnement sont inférieures à 2 dB.

- **Ouverture à - 3 dB**

Comme pour les réseaux d'antennes analysés dans les sous-sections précédentes, ce réseau possède une large ouverture à -3 dB, avec des ouvertures de respectivement de $47,7^\circ$ dans le plan E et $47,8^\circ$ dans le plan H à 60 GHz en espace libre (Figure II.23e).

- **Lobes secondaires de rayonnement**

Contrairement aux réseaux A_2 , A_3 et A_{3b} , le réseau A_4 présente des lobes secondaires dans le plan E (Figure II.23e (ii)). Ces lobes s'expliquent par un écartement entre les éléments rayonnants s_l de l'ordre de λ_g à 60 GHz soit environ $0,65 \cdot \lambda_0$. En espace libre les écarts entre les lobes secondaires et le lobe principal de rayonnement sont de l'ordre de - 11,4 dB, en présence du fantôme les écarts augmentent légèrement pour atteindre - 12,9 dB.

- **Rayonnement arrière**

La présence du fantôme impacte principalement le niveau de rayonnement arrière du réseau d'antennes A_4 . L'écart entre le niveau de rayonnement arrière perpendiculaire à la surface du fantôme (180°) et le lobe principal (0°) est de -21 dB en espace libre, en présence du fantôme l'écart augmente à - 32 dB.

- **Gains et directivités**

La directivité et le gain du réseau A_4 sont insensibles à la présence ou non du fantôme de la peau, puisque dans les deux cas les valeurs sont semblables. En espace libre la directivité du réseau A_4 est de 11,9 dBi et le gain de 11,3 dB.

3.3.5. Bilan

Le Tableau II.7, résume les caractéristiques des diagrammes de rayonnement à 60 GHz des différents réseaux d'antennes étudiés en espace libre. Premièrement, les réseaux A_1 et A_4 présentent des diagrammes de rayonnement avec de lobes secondaires en raison des écartements inter-éléments s supérieurs à $\lambda_0/2$ à 60 GHz, donc les écarts avec lobe principal sont respectivement de -7,6 dB et -11,4 dB. Deuxièmement, les écarts entre les niveaux de rayonnement du lobe arrière à -180° et du lobe principal sont très différents entre les réseaux d'antennes présentant un plan de masse réflecteur arrière et ceux qui n'en présentent pas. Dans le cas où le plan de masse est présent les écarts sont compris entre - 21 et - 29 dB (Tableau II.7), sans plan de masse arrière l'écart est seulement de - 7 dB, soit une différence d'au minimum 14 dB.

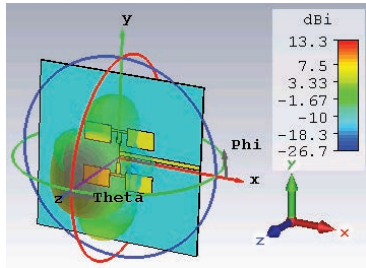
Tableau II.7 - Caractéristiques des diagrammes de rayonnement 60 GHz en espace libre des réseaux d'antennes 2×2 éléments.

Réseaux d'antennes	Lobes secondaire Plan E / Plan H	Niveau lobes Plan E / Plan H (dB)	Rayonnement arrière (dB)
A_1	Oui / Oui	-8 / -16	- 23
A_2	Non / Non	— / —	- 7
A_3	Non / Non	— / —	- 29
A_{3b}	Non / Non	— / —	- 26
A_4	Oui / Non	-11,4 / —	- 21

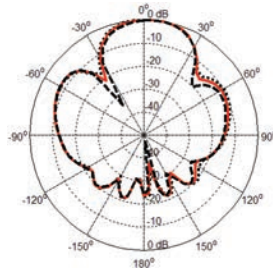
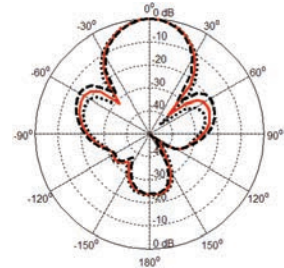
Le Tableau II.8 compare les performances de rayonnements à 60 GHz en espace libre et en présence du fantôme ($h = 1$ mm). L'analyse des données montre que l'efficacité de rayonnement des différents réseaux d'antennes oscille autour de 90 % quel que soit le réseau. En ce qui concerne les gains et les directivités des réseaux, ils sont conformes à ceux requis pour les antennes BAN (gain entre 10 et 12 dB). Pour les réseaux A_1 et A_2 , les valeurs de gain et de directivité ont tendance à augmenter en présence du fantôme équivalent alors qu'elles restent stables pour les réseaux A_3 , A_{3b} et A_4 .

Tableau II.8 - Performances de rayonnement des réseaux d'antennes imprimées à 60 GHz en espace libre (E.L.) ou bien en présence du fantôme (F.) équivalent ($h = 1$ mm).

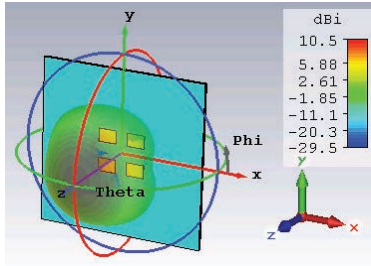
Réseaux d'antennes	Gain (dB)		Directivité (dBi)	
	<i>E. L.</i>	<i>F.</i>	<i>E. L.</i>	<i>F.</i>
A_1	12,4	12,5	13,3	13,5
A_2	9,7	10,2	10,5	11,6
A_3		11,9		10,9
A_{3b}		11,4		10,4
A_4		11,9		11,3



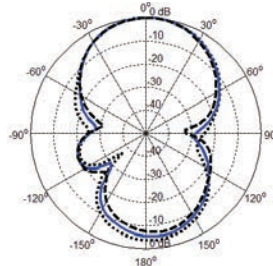
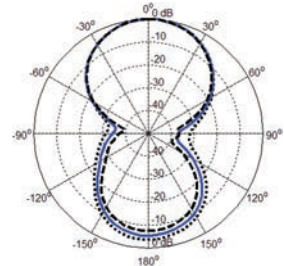
(i) Diagramme 3D à 60 GHz


 (ii) Plan E (Phi = 90°)
(a) Réseau A_1


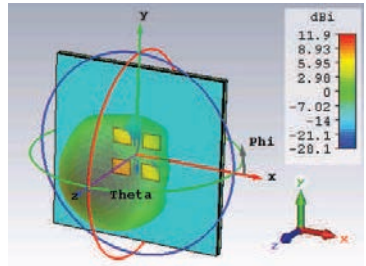
(iii) Plan H (Phi = 0°)



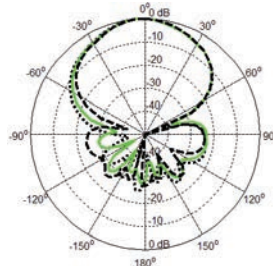
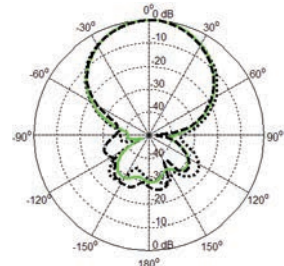
(i) Diagramme 3D à 60 GHz


 (ii) Plan E (Phi = 90°)
(b) Réseau A_2


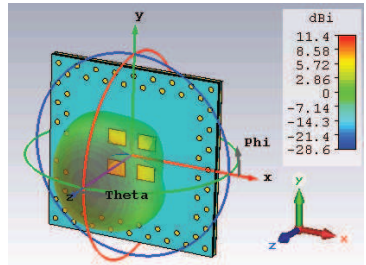
(iii) Plan H (Phi = 0°)



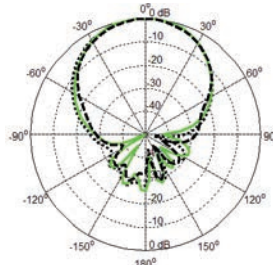
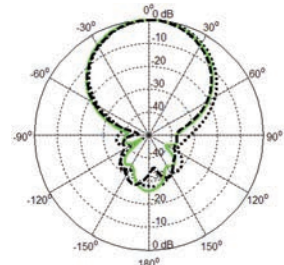
(i) Diagramme 3D à 60 GHz


 (ii) Plan E (Phi = 90°)
(c) Réseau A_3


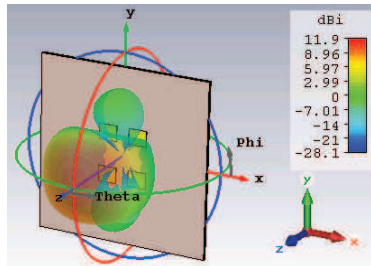
(iii) Plan H (Phi = 0°)



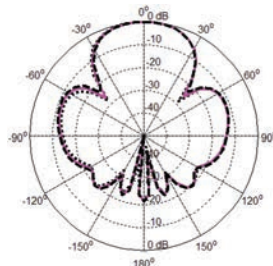
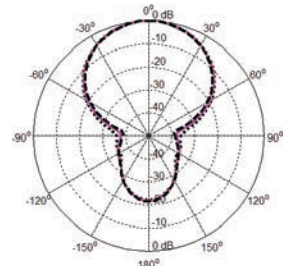
(i) Diagramme 3D à 60 GHz


 (ii) Plan E (Phi = 90°)
(d) Réseau A_{3b}


(iii) Plan H (Phi = 0°)



(i) Diagramme 3D à 60 GHz


 (ii) Plan E (Phi = 90°)
(e) Réseau A_4


(iii) Plan H (Phi = 0°)

 Figure II.22 - Diagramme de rayonnement entre 59-61 GHz des différents réseaux d'antennes en espace libre pour un écartement $h = 1$ mm : (---) 59 GHz, (—) 60 GHz et (---) 61 GHz.

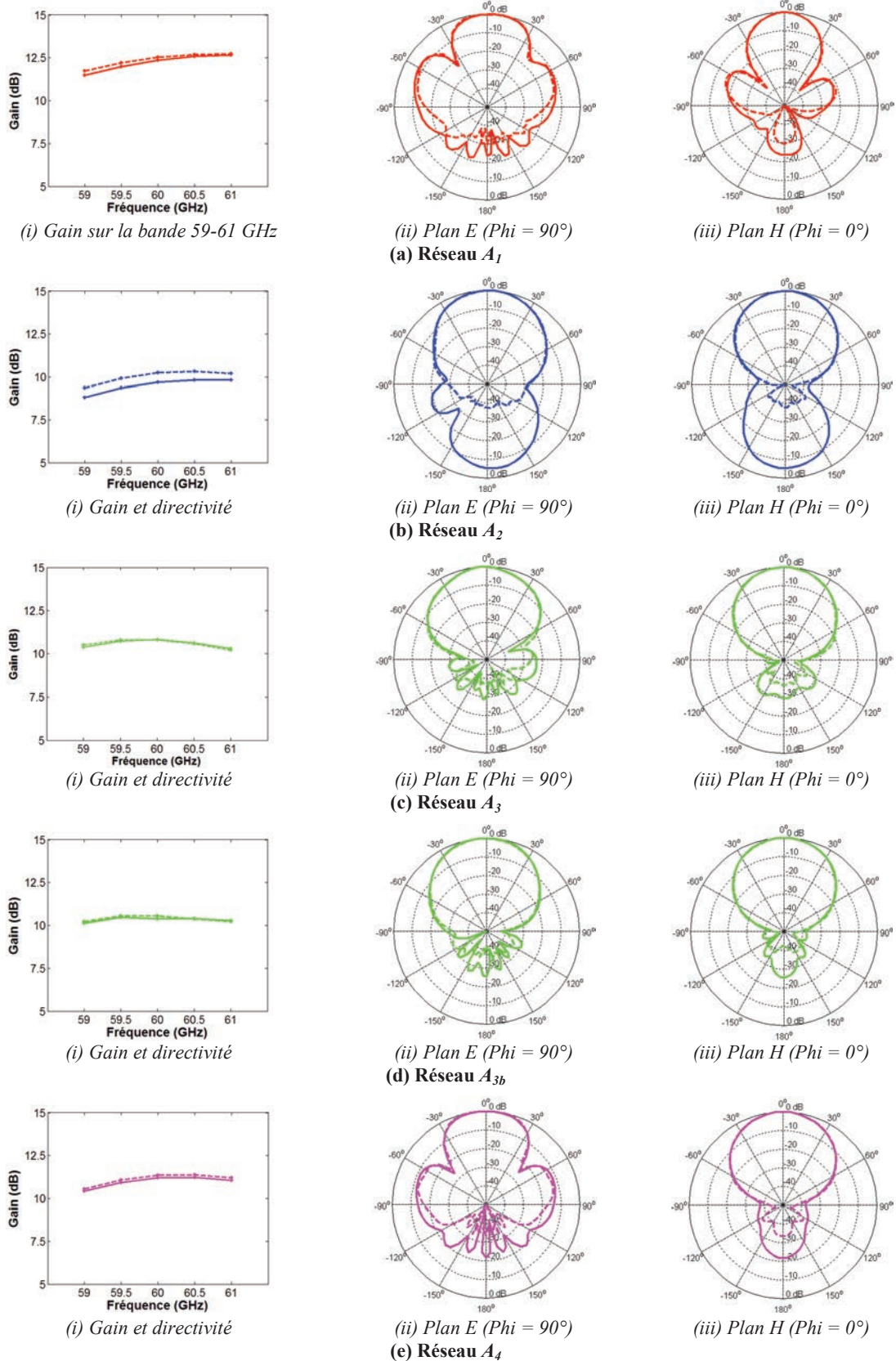


Figure II.23 - Performances en rayonnement à 60 GHz des différents réseaux d'antennes en espace libre (—) et en présence du fantôme équivalent pour un écartement $h = 1$ mm (---).

3.4. Analyse dosimétrique à 60 GHz de l'exposition du fantôme équivalent de la peau

Dans cette sous-section, la distribution de pic de DAS en surface du fantôme équivalent écarté de 1 mm des structures rayonnantes, ainsi que l'impact de l'écartement h sur les niveaux de pic de DAS maximal et sur la puissance absorbée P_a sont évalués à 60 GHz pour chaque réseau d'antenne patch simple (A_1 , A_2 , A_3 , A_{3b} et A_4) dans le cas où la puissance injectée au réseau d'antennes est de 10 mW. La position des structures antennaires est matérialisée sur chacune des figures de distribution de pic de DAS par un carré blanc. Avec les distributions de DAS, c'est la répartition des pics de DAS en surface du fantôme qui est analysée afin de faire le lien avec les modèles de rayonnement étudiés la sous-section précédente. L'étude de l'impact de h permet de faire une analyse quantitative et comparative des niveaux d'exposition entre les réseaux d'antennes patchs pour des puissances acceptées après déduction des pertes par désadaptation équivalentes (9,95 mW pour A_1 , 9,99 mW pour A_2 , 9,87 mW pour A_3 , 9,85 mW pour A_{3b} et 9,97 mW pour A_4).

3.4.1. Réseau d'antennes alimentées par lignes micro-ruban : A_1

▪ Distribution de DAS à la surface du fantôme de la peau

La distribution de pic de DAS générée en surface du fantôme en cas d'exposition au réseau A_1 est présentée en Figure II.24a (i). Ce qui est remarquable en analysant la forme de la distribution de DAS engendré par l'exposition du réseau A_1 , est que les pics de DAS les plus élevés sont répartis de part et d'autre du réseau d'antenne suivant l'axe y . Cette direction dans laquelle se concentrent les valeurs pics élevées correspond au plan E du diagramme de rayonnement pour lequel des niveaux des lobes secondaires sont les plus élevés (Figure II.23a (ii)).

▪ Analyse de l'impact de l'écartement h sur les niveaux d'exposition du fantôme

Les valeurs du DAS maximal (DAS_{max}) ainsi que de la puissance absorbée par le fantôme (P_a) relatives aux différents écartements h , montrent que les valeurs de DAS_{max} et P_a diminuent d'autant plus que l'écart h augmente (Figure II.24a (ii)). En effet, lorsque l'écart h est de seulement 1 mm, la valeur DAS_{max} est de 9,1 W/kg alors qu'elle n'est plus que de 1,1 W/kg lorsque h est égale à 10 mm soit une réduction de près de 88 %. Une tendance semblable est observée en terme de puissance absorbée dans le fantôme, puisque pour $h = 1$ mm P_a est égale à 0,42 mW, et que pour $h = 10$ mm la valeur chute à 0,09 mW soit une réduction de 79 %.

3.4.2. Réseau d'antennes alimentées par fentes couplées avec une arborescence d'alimentation en lignes micro-ruban : A_2

▪ Distribution de DAS à la surface du fantôme de la peau

La distribution surfacique de pic de DAS relative au réseau A_2 est présentée en Figure II.24b (i). Pour ce réseau les pics de DAS les plus élevés sont concentrés sous la structure, dans la direction du lobe de rayonnement arrière. Ces pics peuvent atteindre jusqu'à 498 W/kg lorsque $h = 1$ mm (+55 % par rapport au réseau A_1).

- **Analyse de l'impact de l'écartement h sur les niveaux d'exposition du fantôme**

La Figure II.24b (ii) présente les variations des valeurs de DAS_{max} et de P_a en fonction de l'écartement h générées en surface du fantôme par l'exposition du réseau A_2 . En ce qui concerne les variations de DAS_{max} , comme pour le réseau A_1 , on remarque que la valeur maximale a tendance à diminuer lorsque h augmente. La valeur de DAS_{max} passe de 498 W/kg lorsque l'écart h est égal à 1 mm à 93 W/kg lorsque $h = 10$ mm, soit une réduction de plus de 82 %. En revanche la tendance de P_a est différente pour le réseau A_2 de celle observée du réseau A_1 . Dans le cas du réseau A_2 , la puissance absorbée est plus faible lorsque l'écartement h est égale 1 mm que lorsque l'écart est de 5 mm ou bien 10 mm.

3.4.3. Réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées excitées par lignes triplaques : A_3 et A_{3b}

- **Distribution de DAS à la surface du fantôme de la peau**

Les Figure II.24c (i) et Figure II.24d (i) présentent les distributions de pic de DAS à la surface du fantôme relatives aux expositions des réseaux A_3 et A_{3b} . L'analyse des deux distributions ne montre pas de zones ou bien de directions d'exposition privilégiées nettes et précises à la surface du fantôme comme dans le cas des réseaux A_1 ou bien A_2 . Les valeurs de pic de DAS atteignent jusqu'à 6,34 W/kg pour le réseau A_3 et 1,43 W/kg pour le réseau A_{3b} soit des réductions respectives de 30,3 % et 84,3 % avec le réseau A_1 ou 98,7 % et 99,7 % avec le réseau A_2 .

- **Analyse de l'impact de l'écartement h sur les niveaux d'exposition du fantôme**

L'analyse de l'impact de h sur les valeurs de DAS_{max} des réseaux A_3 (Figure II.24c (ii)) et A_{3b} (Figure II.24d (ii)) montre que dans le cas du réseau A_{3b} la valeur de DAS_{max} est jusqu'à 88 % plus faible que celui pour le réseau A_3 lorsque l'écartement h est égale à 1 mm. Un comportement similaire est observé pour la puissance de puissance absorbée P_a , puisque la réduction apportée par la présence des lignes de via métallisés sur les bords de la structure est seulement de 97 %.

3.4.4. Réseau d'antennes alimentées par fentes couplées excitées par une cavité SIW : A_4

- **Distribution de DAS à la surface du fantôme de la peau**

Comme pour la distribution de pic de DAS spécifique au réseau A_1 , il est remarquable que dans le cas du réseau A_4 (Figure II.24e (i)), les valeurs de pic de DAS en surface du fantôme les plus élevées se situent de part et d'autre du réseau d'antenne A_4 suivant l'axe y , qui correspond au plan de E du diagramme de rayonnement, lequel présente des lobes secondaires. Les valeurs de pic de DAS atteignent jusqu'à 7,4 W/kg pour le réseau A_4 soit une réduction de 18,7 % avec le réseau A_1 et de 98,5 % avec le réseau A_2 . En revanche cela représente une augmentation de 16,7 % par rapport au réseau A_3 .

- **Analyse de l'impact de l'écartement h sur les niveaux d'exposition du fantôme**

En Figure II.24e (ii), les variations des valeurs de DAS_{max} ainsi que de la P_a pour plusieurs écartements h sont analysées pour le réseau d'antenne A_4 . Lorsque l'écart h est de seulement 1

mm, la valeur maximale de DAS_{max} est de 7,4 W/kg, et elle n'est plus que de 0,7 W/kg lorsque h est égale à 10 mm soit une réduction par un facteur proche de 10. Une tendance semblable est observée en ce qui concerne la valeur numérique de la puissance absorbée dans le fantôme, puisque pour $h = 1$ mm la valeur de P_a est de 0,017 mW et pour $h = 10$ mm elle chute à 0,007 mW soit une réduction par un facteur de l'ordre de 2,5.

3.4.5. Bilan

Les différences importantes révélées entre les différents réseaux en termes de distribution de pic de DAS et de niveau de puissance absorbée sont résumées dans le Tableau II.9. Pour aller plus loin, le tableau présente également les valeurs de DAS moyennées sur tout le fantôme sur une épaisseur de 0,5 mm et sur un volume de 1 mm³ sous la localisation de la valeur de DAS_{max} en surface du fantôme.

Le réseau A_2 qui ne présente pas de plan de masse réflecteur arrière, est sans conteste le réseau induisant l'exposition du fantôme la plus élevée. Près de 10 % de la valeur de puissance acceptée par le réseau d'antennes est absorbée par le fantôme contre seulement environ 4 % pour le réseau A_1 qui possède un plan de masse arrière mais présente des lobes secondaires sur son diagramme de rayonnement, ou bien même seulement 0,04 % pour le réseau A_{3b} qui possède un plan de masse arrière et des lignes blindages sur les bords de sa structure, soit respectivement des réductions dans des facteurs compris entre 2,5 et 250. En ce qui concerne les valeurs de DAS_{max} les facteurs de réductions entre les réseaux A_2 et A_1 , ainsi qu'entre A_2 et A_{3b} sont plus importants, ils sont compris respectivement entre 55 et 350 (avec un facteur de réduction de 79 entre le réseau A_2 et A_3 , et 67 entre le réseau A_2 et A_4).

Les réseaux d'antennes A_1 et A_4 qui présentent des lobes secondaires sur leurs diagrammes de rayonnement génèrent une exposition du fantôme provoquant l'absorption par ce dernier de plus de 1 % de la puissance acceptée par les réseaux. Dans le cas des réseaux A_3 et A_{3b} qui possèdent un plan de masse arrière et dont la géométrie évite l'apparition de lobes secondaires la puissance absorbée est inférieure à 1 % de la puissance acceptée pour alimenter les réseaux. L'analyse montre que le maintien d'un écart inter-élément de $\lambda_0/2$ à 60 GHz permet de réduire de 15 % à 30 % les valeurs de DAS_{max} obtenues pour les réseaux d'antennes A_1 et A_4 (comparaison avec la valeur du réseau A_3), et que l'ajout en plus de blindage induit des réductions atteignant jusqu'à 80 % voire même 85 % (comparaison avec la valeur du réseau A_{3b}). L'analyse des DAS moyens permet de nuancer ces résultats et de montrer que les réductions générées par l'ajout de ligne de blindage n'est pas si important en terme de DAS_{max} . En effet, en termes de DAS moyen, la comparaison des valeurs entre les réseaux A_1 , A_4 et A_3 montre que ce dernier génère une réduction comprise entre 70 % et 85 % ; la comparaison des valeurs entre les réseaux A_1 , A_4 et A_{3b} montre que la réduction générée par A_{3b} est comprise entre 80 % et 90 %, soit une réduction de 5 à 10 % des valeurs de DAS moyen due au blindage.

Tableau II.9 - Valeurs de DAS caractéristiques des expositions du fantôme équivalent de la peau à 60 GHz aux différents réseaux d'antennes imprimées.

Réseaux d'antennes	Puissance acceptée ¹ (mW)	DAS (W/kg)			Valeur de P _a (mW)
		Maximal ²	Moyen ³ surface	Moyen ⁴ 1mm ³	
<i>A₁</i>	9,95	9,1	0,244	4,033	0,4200 (4,22 %)
<i>A₂</i>	9,99	498	0,559	167,6	0,9800 (9,81 %)
<i>A₃</i>	9,87	6,34	0,032	0,810	0,0510 (0,52 %)
<i>A_{3b}</i>	9,85	1,43	0,021	0,584	0,0036 (0,04%)
<i>A₄</i>	9,97	7,4	0,107	3,192	0,1858 (1,86%)

¹ La puissance injectée acceptée désigne la puissance injectée (10 mW) après déduction des pertes par réflexion.

² Valeur de DAS crête en surface du fantôme

³ Valeur de DAS moyennée sur le volume sous la surface du fantôme $60 \times 60 \times 0,5 \text{ mm}^3$

⁴ Valeur de DAS centrée sur la valeur de DAS pic en surface du fantôme moyennée sur un volume sous la surface $1,4142 \times 1,4142 \times 0,5 \text{ mm}^3$

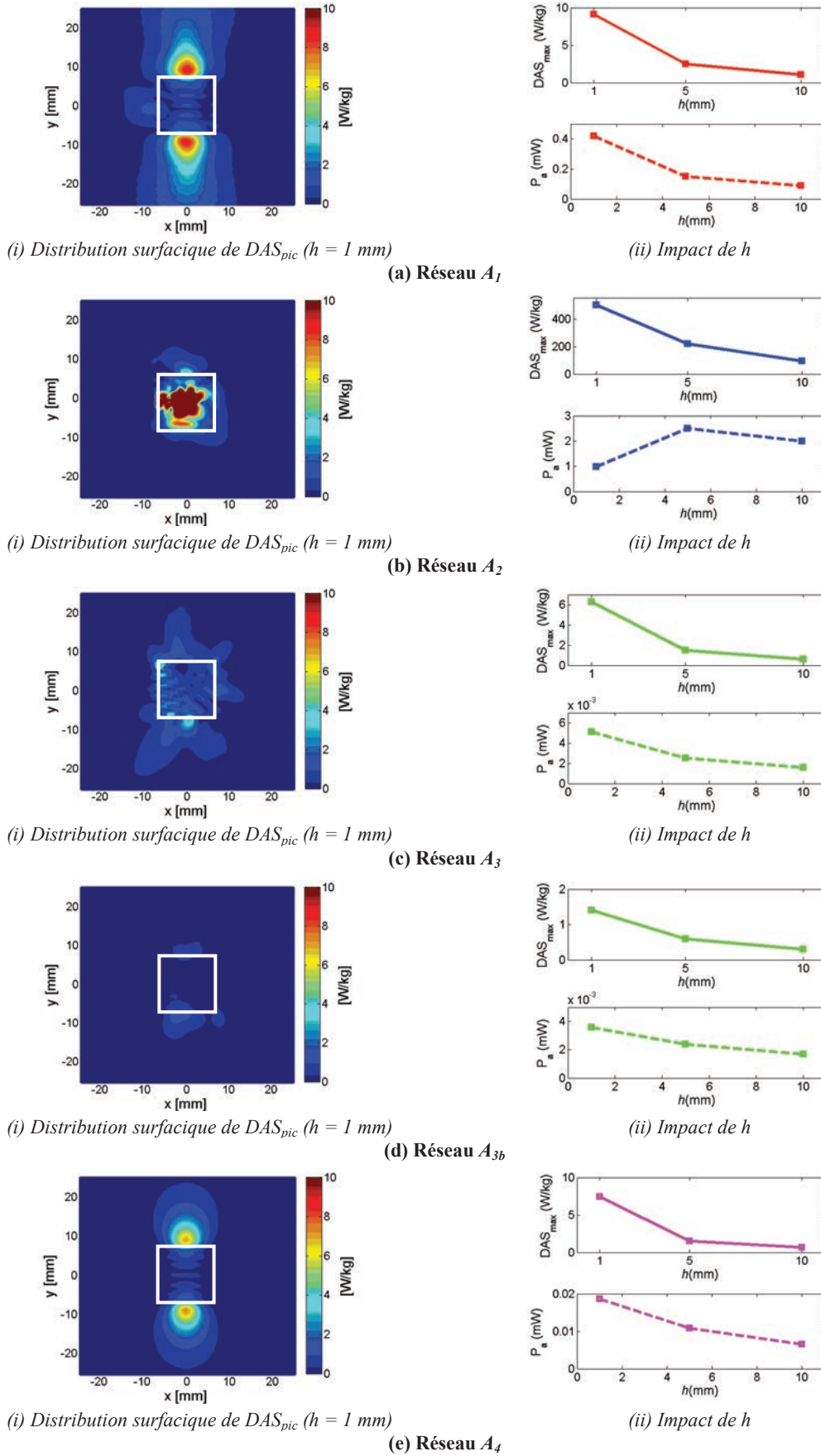


Figure II.24 - - Résultats dosimétriques numériques à 60 GHz pour une puissance injectée $P_i = 10$ mW aux différents réseaux d'antennes.

4. Conclusions

L'analyse des performances des réseaux d'antennes patch alimentées par ligne micro-rubans A_1 et As_1 a mis en évidence l'impact de la présence de lobes secondaires sur le couplage corps antenne à 60 GHz, montrant ainsi l'intérêt de privilégier des méthodes d'alimentation permettant de séparer les antennes patch de l'arborescence d'alimentation afin de conserver un écart entre patch équivalent à $\lambda_0/2$ à la fréquence 60 GHz.

L'alimentation d'antennes imprimées par fente couplées est une bonne alternative à l'alimentation par lignes micro-rubans. Premièrement, elle sépare le niveau de gravure des antennes de celui de l'arborescence d'alimentation par lignes micro-ruban, rendant possible la conservation du critère $\lambda_0/2$ (2,5 mm à 60 GHz) permettant d'éviter l'apparition de lobes secondaires. Deuxièmement, la présence d'un plan de masse entre les antennes et l'arborescence évite que le rayonnement de l'arborescence impacte le diagramme de rayonnement des antennes patch. Cependant, l'analyse des performances des réseaux A_2 et As_2 a montré que, si ils n'induisaient pas l'apparition de lobes secondaires, ils génèrent en revanche un fort rayonnement arrière, dû au rayonnement des lignes micro-rubans gravées sur la face arrière de leur structure multicouche, mais aussi par les fentes gravées sur le niveau métallique interne. Ce fort rayonnement induit deux conséquences négatives : la première est que les performances du réseau sont fortement impactées par la présence du fantôme particulièrement en cas de contact, et la deuxième est que cela induit des niveaux d'exposition du fantôme très élevés (+55 % en termes de DAS_{max}).

La technologie triplaque qui consiste à venir graver des lignes d'alimentation entre deux couches de substrats recouverts par deux plans de masse sur leurs faces extérieures, représente une alternative judicieuse à la technologie micro-ruban pour l'arborescence de la méthode d'alimentation des fentes couplées. En effet la technologie triplaque impose la présence d'un plan de masse réflecteur sur la face arrière de la structure du réseau d'antennes permettant d'isoler l'arborescence du fantôme en cas de contact de la structure antennaire avec la surface du fantôme. Cette solution alternative permet de conserver des écartements inter-éléments égaux à $\lambda_0/2$ à 60 GHz évitant ainsi l'apparition de lobes secondaires. De plus, la présence du plan de masse en face arrière de la structure et de la couche de substrat supplémentaire plus épaisse pour des contraintes de couplage minimisent l'impact du fantôme sur l'adaptation et les performances. Cela permet aussi de garantir une exposition relativement faible du fantôme au rayonnement des réseaux A_3 et A_{3b} par rapport au réseau A_2 (avec des réductions respectives de l'ordre de 78 et 350). Cependant l'inconvénient de l'arborescence en lignes triplaques est qu'elle nécessite des structures multicouches pouvant compter jusqu'à quatre couches de substrat (réseau As_3), ce qui augmente l'encombrement en termes d'épaisseur de la structure, mais aussi la complexité de fabrication du réseau d'antennes.

Une seconde alternative consiste à remplacer les lignes micro-ruban ou triplaques par des guides d'onde intégrés au substrat plus connus sous l'acronyme SIW (Substrat Integrated Waveguide). Cette technologie a déjà été utilisée pour l'excitation de réseaux d'antennes et/ou de fentes [49]. Remplacer le réseau d'alimentation micro-ruban par une arborescence SIW permet comme dans le cas de l'arborescence en lignes triplaques d'isoler le fantôme du rayonnement arrière des fentes grâce à la présence d'un plan de masse sur la face du substrat coté fantôme. Cependant, si l'alternative d'une arborescence d'alimentation en SIW permet de concevoir un réseau d'antennes de structure moins complexe et plus compacte que les réseaux A_3 ou As_3 , elle

induit une augmentation d'un des écarts inter-éléments, engendrant l'apparition de lobes secondaires favorisant l'exposition du fantôme équivalent.

Pour résumer, l'étude comparative menée entre plusieurs réseaux d'antennes 2×2 a donc permis d'évaluer et de quantifier les impacts des différentes méthodes d'alimentation d'antennes imprimées sur la compacité de la structure, l'adaptation du réseau, les performances en rayonnement, ainsi que les niveaux d'exposition à 60 GHz. Cette étude a soulevé deux critères importants dans le choix de la méthode d'alimentation qui permettent d'assurer la stabilité des performances du réseau d'antennes en présence du corps humain et en même temps de garantir une exposition minimale (ces critères étaient bien évidemment entendus, mais nous les avons précisément quantifiés) :

(1) La méthode d'alimentation des antennes patch doit nécessiter un plan de masse réflecteur sur la face arrière de la structure. Ce premier critère permet de garantir la stabilité ou quasi-stabilité de l'adaptation et des performances antennaires même en cas de contact de la face arrière de la structure avec la surface du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz. Il permet aussi de réduire au minimum par un facteur 55 les valeurs maximales de pic de DAS à 60 GHz.

(2) L'écart inter-élément s doit être maintenu à $\lambda_0/2$ à 60 GHz pour éviter l'apparition de lobes secondaires, qui sont les principales sources d'exposition du fantôme en présence des réseaux A_1 et A_4 . Les réseaux A_3 et A_{3b} qui maintiennent cet écart, assurent par exemple des réductions par des facteurs compris entre 1,5 et 6,4 de DAS_{max} par rapport au réseau A_1 et jusqu'à 350 par rapport au réseau A_2 .

De plus, il est important de préciser que la présence de lignes de blindage verticales aux bords de la structure s'avère être une solution efficace dans le cas du réseau A_3 , permettant de réduire par un facteur supérieur à 4,5 les valeurs crêtes de DAS_{max} et par 14 la quantité de puissance absorbée P_a par le fantôme équivalent.

5. Références

- [1] K. Yang, A. Pellegrini, A. Brizzi, A. Alomainy, and Y. Hao, "Numerical analysis of the communication channel path loss at the THz band inside the fat tissue," in *Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO), 2013 IEEE MTT-S International*, 2013, pp. 1–3.
- [2] P. S. Hall and Y. Hao, *Antennas and Propagation for Body-Centric Wireless Communication*, Second Edition. London: Artech House, 2012.
- [3] J. Lilja, P. Salonen, T. Kaija, and P. de Maagt, "Design and Manufacturing of Robust Textile Antennas for Harsh Environments," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 9, pp. 4130–4140, Sep. 2012.
- [4] S. Sankaralingam and B. Gupta, "Determination of Dielectric Constant of Fabric Materials and Their Use as Substrates for Design and Development of Antennas for Wearable Applications," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 59, no. 12, pp. 3122–3130, Dec. 2010.
- [5] K. Koski, L. Sydanheimo, Y. Rahmat-Samii, and L. Ukkonen, "Fundamental Characteristics of Electro-Textiles in Wearable UHF RFID Patch Antennas for Body-Centric Sensing Systems," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 62, no. 12, pp. 6454–6462, Dec. 2014.
- [6] H. R. Raad, A. I. Abbosh, H. M. Al-Rizzo, and D. G. Rucker, "Flexible and Compact AMC Based Antenna for Telemedicine Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 2, pp. 524–531, Feb. 2013.
- [7] A. Arriola, J. I. Sancho, S. Brebels, M. Gonzalez, and W. De Raedt, "Stretchable dipole antenna for body area networks at 2.45 GHz," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 7, p. 852, 2011.
- [8] J. Trajkovikj, J.-F. Zurcher, and A. K. Skrivervik, "PDMS, A Robust Casing for Flexible W-BAN Antennas [EurAAP Corner]," *Antennas Propag. Mag. IEEE*, vol. 55, no. 5, pp. 287–297, 2013.
- [9] P. J. Soh, G. A. Vandenbosch, and J. Higuera-Oro, "Design and evaluation of flexible CPW-fed ultra wideband (UWB) textile antennas," in *RF and Microwave Conference (RFM), 2011 IEEE International*, 2011, pp. 133–136.
- [10] Yuehui Ouyang and W. J. Chappell, "High Frequency Properties of Electro-Textiles for Wearable Antenna Applications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 56, no. 2, pp. 381–389, Feb. 2008.
- [11] Z. Wang, L. Zhang, Psychoudakis, and J. L. Volakis, "Flexible Textile Antennas for Body-Worn Communication," presented at the Antenna Technology (iWAT), 2012 IEEE International Workshop on, Tucson, AZ, 2012, pp. 205 – 208.
- [12] Y. Bayram, Yijun Zhou, Bong Sup Shim, Shimei Xu, Jian Zhu, N. A. Kotov, and J. L. Volakis, "E-Textile Conductors and Polymer Composites for Conformal Lightweight Antennas," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 58, no. 8, pp. 2732–2736, Aug. 2010.
- [13] L. Zhang, Z. Wang, and J. L. Volakis, "Textile Antennas and Sensors for Body-Worn Applications," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 1690–1693, 2012.
- [14] X. Y. Wu, Y. Nechayev, and P. S. Hall, "Antenna design and channel measurements for on-body communications at 60 GHz," in *General Assembly and Scientific Symposium, 2011 XXXth URSI*, 2011, pp. 1–4.
- [15] X. Y. Wu, L. Akhoondzadeh-Asl, and P. S. Hall, "Printed Yagi-Uda array for on-body communication channels at 60 GHz," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 53, no. 12, pp. 2728–2730, Dec. 2011.

- [16] N. Chahat, M. Zhadobov, L. Le Coq, and R. Sauleau, "Wearable Endfire Textile Antenna for On-Body Communications at 60 GHz," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 11, pp. 799–802, 2012.
- [17] M. Mantash, A.-C. Tarot, S. Collardey, and K. Mahdjoubi, "Wearable monopole zip antenna," *Electron. Lett.*, vol. 47, no. 23, pp. 1266–1267, 2011.
- [18] B. Sanz-Izquierdo, J. C. Batchelor, and M. I. Sobhy, "Button antenna on textiles for wireless local area network on body applications," *IET Microw. Antennas Propag.*, vol. 4, no. 11, p. 1980, 2010.
- [19] J. Puskely, M. Pokorny, J. Lacik, and Z. Raida, "Wearable Disc-like Antenna for Body Centric Communications at 61 GHz," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, pp. 1–1, 2014.
- [20] A. W. Straiton, "The Absorption and Reradiation of Radio Waves by Oxygen and Water Vapor in the Atmospher," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 23, no. 4, pp. 595–597, Jul. 1975.
- [21] P. F. M. Smulders, "Impact of regulations on feasible distance between 60 GHz devices," in *Antennas and Propagation (EuCAP), 2010 Proceedings of the Fourth European Conference on*, 2010, pp. 1–4.
- [22] N. Chahat, M. Zhadobov, L. Le Coq, S. I. Alekseev, and R. Sauleau, "Characterization of the Interactions Between a 60-GHz Antenna and the Human Body in an Off-Body Scenario," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 12, pp. 5958–5965, Dec. 2012.
- [23] N. Chahat, M. Zhadobov, S. A. Muhammad, L. Le Coq, and R. Sauleau, "60-GHz Textile Antenna Array for Body-Centric Communications," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 61, no. 4, pp. 1816–1824, Apr. 2013.
- [24] P. Vasina and J. Lacik, "2 X 2 SIW rectangular ring slot antenna array for 60 GHz band," in *Microwave Techniques (COMITE), 2015 Conference on*, 2015, pp. 1–4.
- [25] J. Wang, O. Fujiwara, and T. Takagi, "Effects of ferrite sheet attachment to portable telephone in reducing electromagnetic absorption in human head," in *Electromagnetic Compatibility, 1999 IEEE International Symposium on*, 1999, vol. 2, pp. 822–825.
- [26] M. T. Islam, M. R. I. Faruque, and N. Misran, "Reduction of specific absorption rate (SAR) in the human head with ferrite material and metamaterial," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 9, pp. 47–58, 2009.
- [27] R. Augustine, T. Alves, T. Sarrebourg, B. Poussot, K. T. Mathew, and J.-M. Laheurte, "Polymeric ferrite sheets for SAR reduction of wearable antennas," *Electron. Lett.*, vol. 46, no. 3, pp. 197–199, 2010.
- [28] H. H. Chou, H.-T. Hsu, H.-T. Chou, K.-H. Liu, and F.-Y. Kuo, "Reduction of specific absorption rate (SAR) in the human head with ferrite material and metamaterial," *Prog. Electromagn. Res. C*, vol. 94, pp. 281–296, 2009.
- [29] K. H. Chan, K. M. Chow, L. C. Fung, and S. W. Leung, "Effects of using conductive materials for SAR reduction in mobile phones," *Microw. Opt. Technol. Lett.*, vol. 44, no. 2, pp. 140–144, 2005.
- [30] N. H. M. Hanafi, M. T. Islam, N. Misran, and M. R. I. Faruque, "Numerical analysis of aluminium sheet for SAR reduction," in *Space Science and Communication (IconSpace), 2011 IEEE International Conference on*, 2011, pp. 281–285.
- [31] M.-S. Lin, Y.-H. Huang, and C.-I. G. Hsu, "Design a dual-band high-impedance surface structure for electromagnetic protection in WLAN applications," in *Electromagnetic Compatibility, Tokyo (EMC'14/Tokyo), 2014 International Symposium on*, 2014, pp. 525–528.

- [32] M. R. I. Faruque, N. Misran, and M. T. Islam, "Split ring resonators for SAR reduction in human head," in *Communications (APCC), 2011 17th Asia-Pacific Conference on*, 2011, pp. 880–883.
- [33] N. Chahat, M. Zhadobov, R. Sauleau, and K. Mahdjoubi, "Improvement of the on-body performance of a dual-band textile antenna using an EBG structure," in *Antennas and Propagation Conference (LAPC), 2010 Loughborough*, 2010, pp. 465–468.
- [34] K. Agarwal, Y.-X. Guo, B. Salam, and L. C. W. Albert, "Latex based near-endfire wearable antenna backed by AMC surface," in *Microwave Workshop Series on RF and Wireless Technologies for Biomedical and Healthcare Applications (IMWS-BIO), 2013 IEEE MTT-S International*, 2013, pp. 1–3.
- [35] A. Niembro-Martin, F. De Barros, G. Eymin-Petot-Tourtollot, P. Lemaître-Auger, E. Pistono, and T.-P. Vuong, "Metapaper: a Frequency Selective Surface Wallpaper for the attenuation of Wi-Fi signals," presented at the The 45th European Microwave Conference, 2015.
- [36] R. Waterhouse, "Microstrip Patch Antennas," in *Handbook of Antennas in Wireless Communications*, Lal Chand Godara, 2001, p. 888.
- [37] A. Sabban, *Microstrip antenna arrays*. INTECH Open Access Publisher, 2011.
- [38] D. M. Pozar, "An Updase on Microstrip Antenna Theory and Design Including Some Novel Feeding Techniques," *IEEE Antennas Propag. Soc. Newslette*, Oct. 1986.
- [39] M. D. Sharma, A. Katariya, and R. S. Meena, "E Shaped Patch Microstrip Antenna for WLAN Application Using Probe Feed and Aperture Feed," 2012, pp. 66–70.
- [40] "RT/duroid 5870-5880 'http://www.rogerscorp.com/acs/products/32/RT-duroid-5880-Laminates.aspx.'"
- [41] N. Chahat, M. Zhadobov, and R. Sauleau, "Broadband Tissue-Equivalent Phantom for BAN Applications at Millimeter Waves," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 7, pp. 2259–2266, Jul. 2012.
- [42] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, p. 2271, 1996.
- [43] K. Ito, K. Furuya, Y. Okano, and L. Hamada, "Development and Characteristics of a Biological Tissue-Equivalent Phantom for Microwaves," *Electron. Commun. Jpn.*, vol. 84, no. 4, pp. 67–77, Apr. 2001.
- [44] F. A. Duck, *Physical Properties of Tissue: A Comprehensive Reference Book*, Academic Press. Harcourt Brace Jovanovich, 1990.
- [45] Y. Nai, R. Xing, and D. Sun, "Analysis of wide-band aperture-coupled microstrip antenna array by CN-FDTD," in *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2010 International Conference on*, 2010, pp. 823–826.
- [46] T. Sarrazin, H. Vettikalladi, O. Lafond, M. Himdi, and N. Rolland, "Low cost 60 GHz new thin Pyralux membrane antennas fed by substrate integrated waveguide," *Prog. Electromagn. Res. B*, vol. 42, pp. 207–224, 2012.
- [47] X. Lin, M. Luo, Y. Yang, and K. Huang, "High-gain aperture-coupled microstrip array antenna," in *Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT), 2012 International Conference on*, 2012, vol. 5, pp. 1–4.
- [48] A. Bhattacharyya, O. Fordham, and Y. Liu, "Analysis of stripline-fed slot-coupled patch antennas with vias for parallel-plate mode suppression," *Antennas Propag. IEEE Trans. On*, vol. 46, no. 4, pp. 538–545, 1998.

- [49] W. M. Abdel-Wahab and S. Safavi-Naeini, "Wide-Bandwidth 60-GHz Aperture-Coupled Microstrip Patch Antennas (MPAs) Fed by Substrate Integrated Waveguide (SIW)," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 10, pp. 1003–1005, 2011.

Chapitre III. Réalisation et mesure des réseaux d'antennes *off-body* à 60 GHz

Sommaire

1.	Introduction	81
2.	Description de la réalisation des prototypes des réseaux d'antennes	82
2.1.	Contraintes de fabrication.....	82
2.2.	Séquences de fabrication des prototypes	84
2.3.	Tolérances et limites technologiques.....	89
3.	Prototypes de réseaux d'antennes <i>off-body</i>	92
3.1.	Détails des prototypes réalisés.....	92
3.2.	Répartition et positionnement des prototypes sur les planches	93
3.3.	Estimation des précisions de gravure et d'alignement	95
4.	Performances expérimentales des prototypes	98
4.1.	Matériels et méthodes.....	98
4.2.	Adaptation des prototypes sur la bande 55-65 GHz	100
4.3.	Résultats en rayonnement.....	104
4.4.	Gain et efficacité du rayonnement des prototypes.....	112
5.	Conclusion	117
6.	Références	119

1. Introduction

Dans le chapitre II plusieurs réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz dont la méthode d'alimentation diffère ont été étudiés numériquement. Les structures ainsi que l'adaptation et les performances en rayonnement des réseaux ont été comparées en espace libre et en présence d'un fantôme équivalent de la peau humaine. Le couplage corps/antennes a fait l'objet pour chaque réseau d'antennes d'une étude dosimétrique via le calcul des valeurs crêtes et moyennées de DAS ainsi que de la puissance absorbée. L'étude menée a permis de comparer et quantifier l'impact de certains éléments de conception liés aux choix de la méthode d'alimentation du réseau d'antennes pouvant fortement impacter les interactions corps/antenne.

Les réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz, dont les performances antennaires et le couplage avec le corps ont été étudiés et comparés numériquement dans le Chapitre II, ont fait l'objet d'une phase de prototypage puis, d'une phase de mesure des performances antennaires dont nous présentons les résultats dans ce Chapitre III.

Dans la section 2, les spécificités de la réalisation des différents réseaux d'antennes sont présentées telle que les contraintes technologiques. La réorganisation des structures multicouches de substrat induites par ces contraintes, ainsi que les séquences de fabrication sont ensuite détaillées. L'impact des tolérances de fabrication sur la gravure et l'alignement des couches de cuivre des structures est également étudié numériquement, afin d'estimer les écarts de mesure acceptables pour chaque prototype par rapport aux résultats optimaux attendus. Cette étude met également en avant la complexité de réalisation de certains réseaux. La section 3 présente les prototypes de réseaux d'antennes réalisés, ainsi que leurs implantations sur les planches de substrat multicouche. Les résultats des mesures en espace libre et en présence du fantôme équivalent de la peau humaine sont présentés dans la section 4 en réflexion et en rayonnement. Les niveaux d'adaptation à -10 dB du module S_{11} , les modèles de rayonnement et les gains expérimentaux sont comparés aux résultats obtenus numériquement sous CST MWS en tenant en compte de la présence du connecteur du mesure.

2. Description de la réalisation des prototypes des réseaux d'antennes

Cette section décrit les points essentiels liés au prototypage des réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz : (1) contraintes technologiques induites par la stratification des couches de substrat, (2) renforts de cuivre liés aux séquences de via métallisées, (3) allongement pour l'accès de la connectique à l'arborescence d'alimentation. Les séquences de fabrication et les structures sont détaillées pour chaque réseau d'antennes. Ensuite, l'estimation des déviations maximales pouvant être induites par les tolérances de fabrication sur les performances attendues des réseaux d'antennes sont évaluées numériquement sous CST MWS.

2.1. Contraintes de fabrication

Les structures des réseaux d'antennes *off-body* étudiées et comparées dans le chapitre II ne sont pas réalisables en l'état. Pour avoir une vision plus précise des structures des prototypes, il faut tenir compte des contraintes de fabrication liées aux procédures de fabrication et à la connectique de mesure.

2.1.1. Procédés technologiques utilisés

▪ Stratification de couches de substrat

Pour pouvoir assembler deux couches de substrat, il est indispensable d'ajouter entre les deux substrats une couche de prépreg (Figure III.1). Le prépreg est un film de colle utilisé pour assembler deux couches entre elles lors d'une procédure de pressage à chaud.

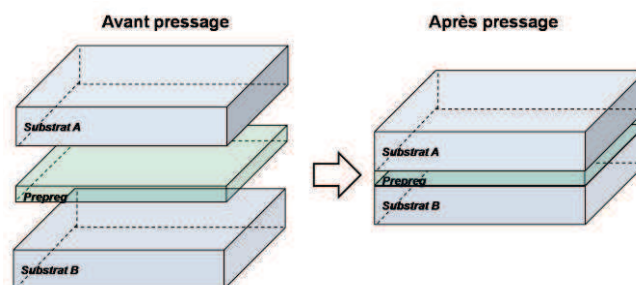


Figure III.1 - Représentation schématique de la procédure de stratification par pressage entre deux couches de substrat.

Généralement le prépreg est choisi en fonction de ses propriétés diélectriques, de sorte à ce qu'elles ne soient pas trop éloignées de celle du substrat. Dans la mesure du possible les films de prépreg sont généralement choisis avec des épaisseurs fines.

Le prépreg utilisé pour la stratification des structures des prototypes de réseaux d'antennes est un FastRise™ 27 de chez Taconic [1]. Ce prépreg a l'avantage de présenter des propriétés diélectriques et thermo-physiques assez proches de celles du RT/Dudoid 5880 choisi comme substrat pour les réseaux d'antennes (Tableau III.1). Précisons que l'épaisseur de ce film de colle est de 90 μm .

Tableau III.1 - Propriétés électromagnétiques et thermo-physiques du substrat [2] à 60 GHz et du prépreg à 40 GHz [1] utilisés pour réaliser les structures multicouches des réseaux d'antennes.

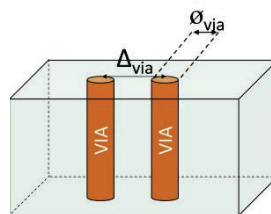
Matériaux	Constante diélectrique ϵ_r	Facteur de dissipation $\tan \delta$	Conductivité thermique k (W/(m·°C))	Densité ρ (kg/m ³)
RT/Duroid 5880	2,2	0,003	0,20	2200
FastRiseTM 27	2,7	0.0017	0,25	1820

▪ Perçages et renforts de métallisation

Plusieurs des réseaux d'antennes étudiés dans le chapitre II nécessitent une, voire deux séquences de via métallisés. C'est le cas des réseaux d'antennes A_3 , A_{3b} et As_3 où des séquences de via métallisés sont utilisées comme blindage autour des fentes pour éviter la propagation de modes parasites, ou encore sur les bords de la structure (A_{3b}) pour éviter que des modes triplaques se propagent dans la structure et rayonnent en direction du fantôme. En ce qui concerne les réseaux A_4 et As_4 , ils utilisent des lignes de via pour guider le signal dans le substrat (guide d'onde SIW).

Ces séquences de perçage ajoutent des étapes supplémentaires à la procédure de fabrication qui complexifient la réalisation et modifient les épaisseurs des couches de cuivre sur les niveaux métallisés des structures où débouchent les via. Car, si pour métalliser les via, une méthode par point de centre (cuivrage électrolytique) permettant de déposer 25 μm de cuivre uniquement dans les perçages est utilisée, elle nécessite au préalable qu'une couche d'accroche de cuivre 8 μm soit déposée dans les perçages par cuivrage chimique. Ce dépôt chimique induit également une couverture de 8 μm des surfaces de la structure où débouchent les via. Précisons qu'en plus des renforts de cuivre liés aux métallisations des via, un dépôt cuivré de 25 μm est effectué sur les couches externes des structures multicouches en fin de procédure de fabrication (métallisation Pattern), ce dépôt est effectué après que les gravures sur les faces externes aient été réalisées.

Plusieurs recommandations sont à respecter concernant les perçages dédiés à être des via métallisés, comme par exemple le diamètre de trou percé des via (ϕ_{via}) qui est un critère dépendant de l'épaisseur de la structure à percer. Plus la structure à percer est épaisse et plus le diamètre de trou percé doit être large afin d'assurer la métallisation sur toute la profondeur du perçage. De ce diamètre de trou percé dépend ensuite, la taille des pastilles de cuivre sur les surfaces débouchantes des via, mais aussi l'entraxe entre les via (Δ_{via}) à respecter pour éviter que la structure ne soit trop fragilisée par les perçages et se déchire.

**Figure III.2 - Illustration des caractéristiques de perçages.**

2.1.2. Accès du connecteur de mesure

Pour connecter les réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz aux appareils de mesure, le connecteur présenté en Figure III.3a est utilisé. Ce connecteur, spécifique aux mesures en bande V est composé de plusieurs éléments (Figure III.3b) tous assemblés sur un même support en laiton

réalisé à l'IETR. Les différentes parties du connecteur ont été modélisées numériquement, afin de pouvoir évaluer plus précisément l'impact de sa présence sur les performances des réseaux d'antennes 60 GHz.

Ce connecteur permet de faire la liaison entre une ligne d'alimentation imprimée micro-ruban et la connectique de mesure. Or les réseaux d'antennes alimentés par fentes avec des arborescences en lignes triplaque ou en SIW ne présentent pas de ligne d'accès micro-ruban. De plus, afin de relier la masse des réseaux d'antennes à celles du connecteur, les plans de masse d'une même structure doivent être reliés et/ou accessibles.

Afin de rendre connectable les réseaux d'antennes et dans un souci d'homogénéité entre les prototypes, tous les réseaux d'antennes ont un côté de leur structure allongé de 5 mm. Cette allongement ou « *languette d'alimentation* » doit permettre d'y inclure une transition entre l'arborescence d'alimentation des antennes et le connecteur de mesure si besoin et donner accès à la masse.

Ces allongements complexifient les procédures de fabrication des structures antennaires, car l'accès à certains niveaux de métallisation nécessite des ablations de matière mécanique (pré-assemblage) ou laser (post-assemblage), lesquelles nécessitent d'inclure des étapes supplémentaires dans les différentes séquences de fabrication.

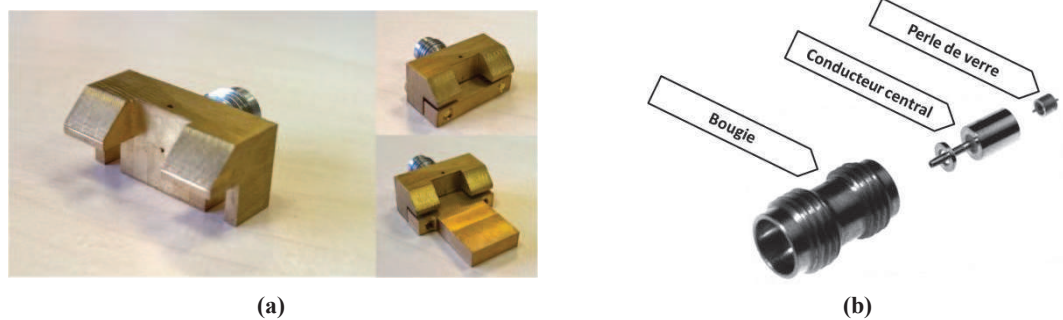


Figure III.3 - Connecteur pour les mesures en bande V : (a) photographies du connecteur monté sur le support en laiton ; (b) les différents éléments du connecteur [3].

2.2. Séquences de fabrication des prototypes

Le pôle prototypage de l'IETR dispose d'un système laser (ProtoLaser S) permettant de réaliser des gravures sur substrat. Seul le réseau d'antennes A_1 qui est monocouche a été réalisé au laboratoire avec ce procédé. En effet, il a été fait appel à un prestataire extérieur pour la réalisation des prototypes multicouche.

Pour limiter les coûts et réduire les délais de fabrication des prototypes, la réalisation des réseaux d'antennes multicouches a été scindée en seulement trois séquences de fabrication relatives au nombre de couches de substrat dans les structures (Figure III.4). Les réseaux d'antennes A_2 , A_4 , A_{4b} et As_1 qui possèdent tous une structure composée de deux couches de substrat d'épaisseur 127 μm ont été regroupés en une même séquence de fabrication (Figure III.4b). C'est également le cas pour les réseaux A_3 , A_{3b} , As_2 , As_4 et As_{4b} qui eux sont composés de deux couches de substrat 127 μm , et d'une troisième de 381 μm d'épaisseur (Figure III.4c). Enfin, les réseaux As_3 et As_{3b} possèdent une structure composée de quatre couches de substrat (Figure III.4d).

La structure 2C (Figure III.4b) est constituée de deux couches de substrat de même épaisseur ; elle ne nécessite qu'une seule phase d'assemblage. Au préalable de cette phase d'assemblage, une

première séquence de perçage ($\phi_1 = 0,200$ mm) et de métallisation de via est réalisée entre les niveaux métallisés m_2 et m_3 de la couche de substrat Sub_2 . Suivis ensuite d'une phase de gravure du niveau m_2 qui n'est plus accessible après assemblage. Après assemblage, la seconde séquence de perçage ($\phi_2 = 0,400$ mm) et de métallisation de via est effectuée entre les niveaux m_1 et m_3 , puis les motifs micro-ruban présents sur m_1 et m_3 sont gravés successivement, avant un dépôt de cuivre électrolytique sur les gravures de ces mêmes couches.

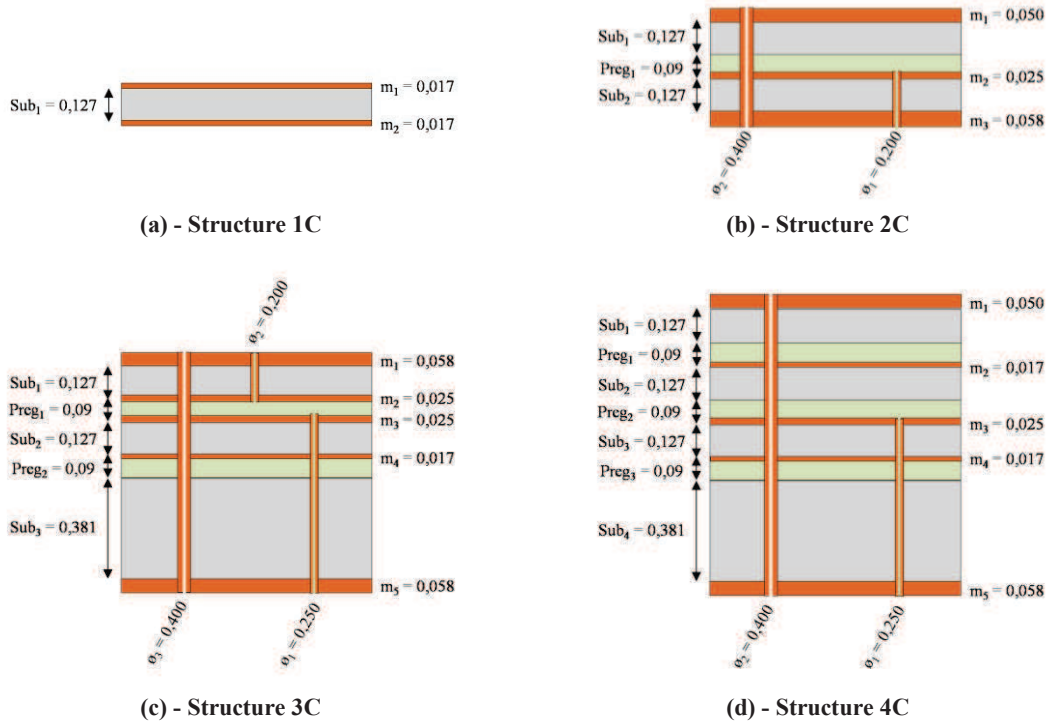


Figure III.4 - Structures relatives aux différentes séquences de réalisations des prototypes des réseaux d'antennes 60 GHz tenant compte des contraintes de réalisation.

La structure 3C (Figure III.4c) est composée de trois couches de substrat nécessitant deux phases d'assemblage. Avant le premier assemblage qui implique les couches Sub_2 et Sub_3 , les motifs sur le niveau m_4 sont gravés. A la suite du premier assemblage, une première séquence de via métallisés ($\phi_1 = 0,250$ mm) est réalisée entre les niveaux m_3 et m_5 de la structure stratifiée, suivis de la gravure sur le niveau m_3 . Avant le second assemblage, une deuxième séquence de perçage de via métallisés ($\phi_2 = 0,200$ mm) est réalisée entre les niveaux m_1 et m_2 de la couche Sub_1 , puis les motifs du niveau m_2 sont gravés. Après le second assemblage qui implique Sub_1 et la structure préalablement stratifiée $Sub_2 + Sub_3$, une troisième séquence de via ($\phi_3 = 0,400$ mm) est percée et métallisée entre les niveaux m_1 et m_5 , puis les motifs sont gravés successivement sur les surfaces de la structure avant un dernier dépôt de cuivre électrolytique uniquement sur les motifs gravés.

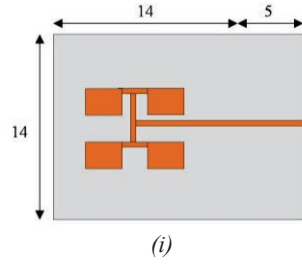
La structure 4C (Figure III.4c) est un empilement de quatre couches de substrat nécessitant deux phases d'assemblage. La première phase est semblable à celle de la structure 3C. En revanche, la deuxième phase diffère car, contrairement au cas de la structure 3C, ce n'est pas une couche de substrat, mais deux qui sont assemblées avec la structure stratifiée au cours du premier pressage. Au préalable de ce deuxième assemblage, les motifs présent sur le niveau de cuivre m_2 de la couche de substrat Sub_2 sont gravés, et après assemblage une deuxième séquence de via (ϕ_2

= 0,400 mm) est réalisée entre les niveaux m_1 et m_5 , puis les motifs sont gravés successivement sur ces deux niveaux de cuivre avant le dépôt de cuivre électrolytique.

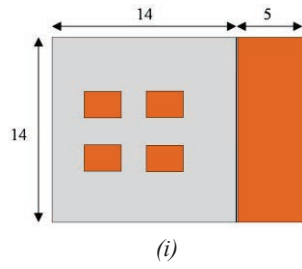
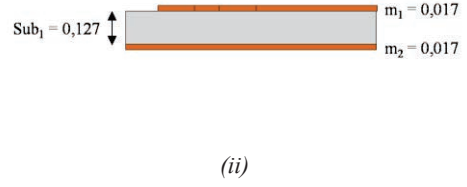
Ces regroupements permettent d'organiser la réalisation de l'ensemble des réseaux d'antennes étudiés en seulement trois séquences de fabrication relatives au nombre de couche de substrat des structures présentées en Figure III.4. Cependant, cette organisation induit que les contraintes concernant les renforts de cuivre sont généralisées à l'ensemble des prototypes partageant la même séquence. C'est le cas pour les prototypes du réseau d'antennes A_2 dont les épaisseurs de cuivre à considérer sont augmentées par les contraintes de renfort de cuivre imposées par les réseaux A_4 et A_{4b} . C'est aussi le cas pour le réseau As_2 qui verrait les épaisseurs de ses niveaux de cuivre réduire s'il était réalisé individuellement.

Les Figure III.5 et Figure III.6 présentent la vue de dessus et la vue en coupe des structures stratifiées pour chaque réseau d'antennes étudié. Ces structures tiennent compte des contraintes technologiques d'assemblage, lesquelles nécessitent l'incorporation de couche de prépreg entre les couches de substrat, des renforts de cuivre sur les niveaux de métallisation où débouchent les via, ainsi qu'un accès pour la connectique. Pour la dernière contrainte, on distingue clairement sur les figures des vues en coupe les allongements permettant de connecter des prototypes.

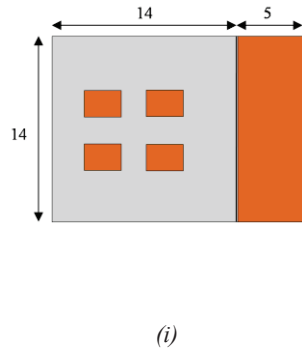
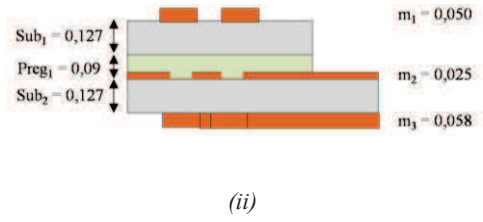
Il est important de préciser que suite aux réorganisations des structures des réseaux d'antennes, les dimensions des antennes et des arborescences d'alimentation ont été ré-optimisées numériquement, les nouvelles dimensions des motifs sont détaillées en **Annexe B**. Les résultats numériques obtenus sans le connecteur de mesure pour les réseaux d'antennes en espace libre et en présence du fantôme sont donnés en **Annexe C**. Les résultats numériques prenant en compte les effets de la présence du connecteur sont comparés aux résultats expérimentaux dans la suite de ce chapitre.



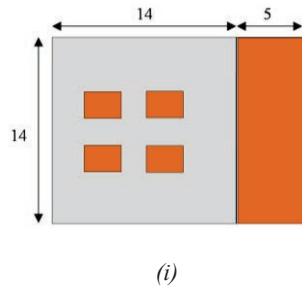
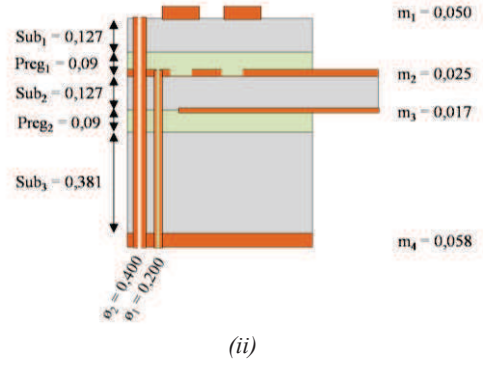
(a) - Réseau A_1



(b) - Réseau A_2



(c) - Réseau A_3 ou A_{3b}



(d) - Réseau A_4 ou A_{4b}

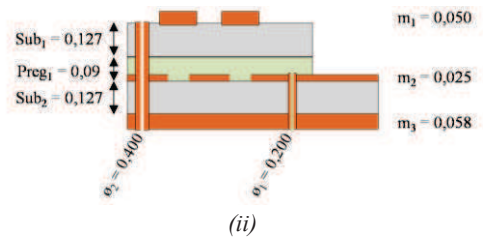


Figure III.5 - Schématisation de la vue (i) de dessus et (ii) en coupe des structures des réseaux d'antennes 60 GHz non-empilées (dimensions en mm).

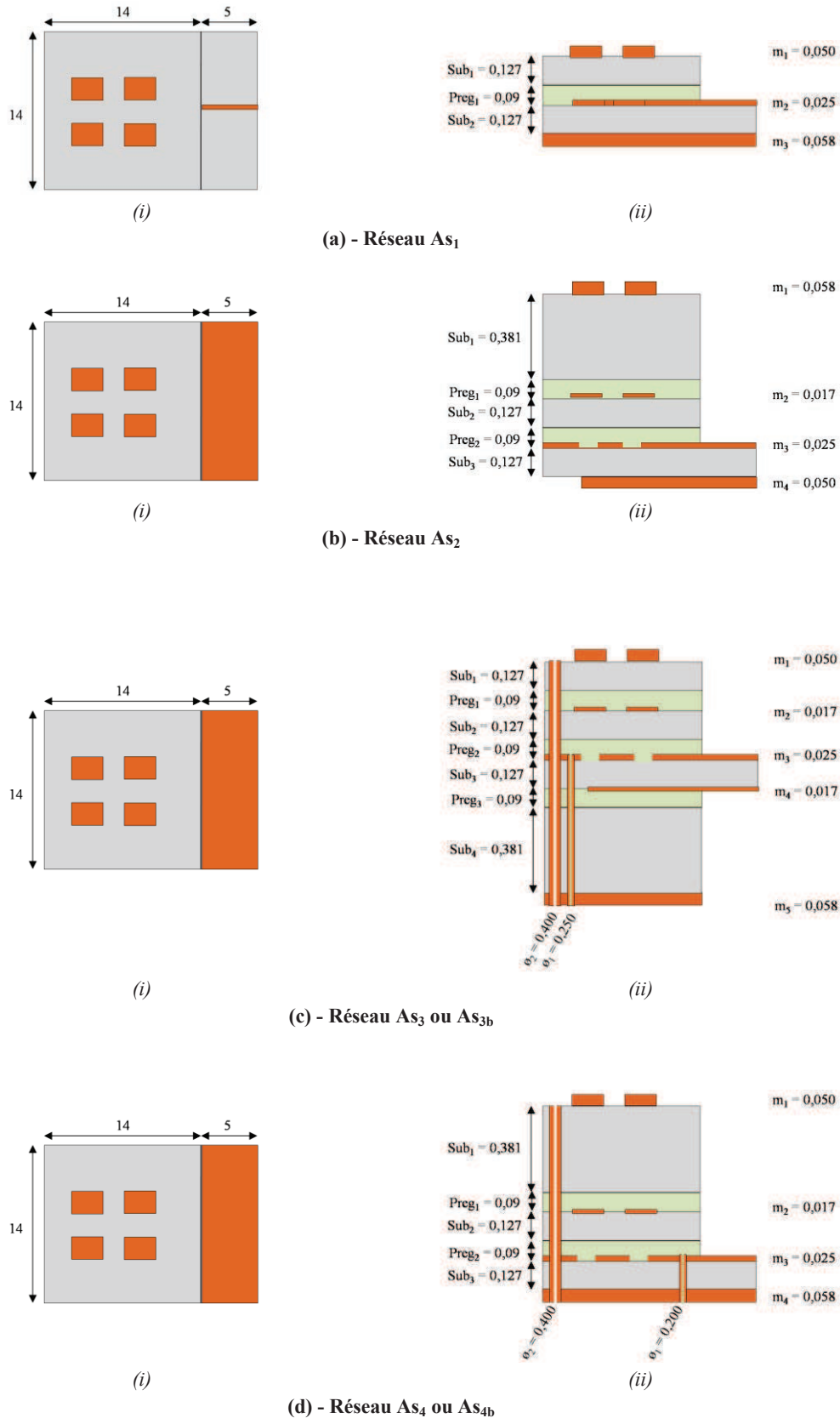


Figure III.6 - Schématisation de la vue (i) de dessus et (ii) en coupe des structures des réseaux d'antennes 60 GHz empilées (dimensions en mm).

2.3. Tolérances et limites technologiques

2.3.1. Précision de gravure

La précision de gravure est liée à l'épaisseur de la couche de cuivre. Les précisions garanties pour les différentes structures des réseaux d'antennes (Figure III.4) sont résumées dans le Tableau III.2.

Remarque : L'épaisseur de métallisation pattern n'impacte pas la précision de gravure car cette métallisation est réalisée post-gravure.

Tableau III.2 - Précisions de gravure sur les différents niveaux de métallisation des structures des réseaux d'antennes (valeurs en mm).

Niveaux de métallisation	Structures			
	1C	2C	3C	4C
m_1	$\pm 0,020$	$\pm 0,030$	$\pm 0,030$	$\pm 0,030$
m_2	$\pm 0,020$	$\pm 0,030$	$\pm 0,030$	$\pm 0,020$
m_3		$\pm 0,030$	$\pm 0,030$	$\pm 0,030$
m_4			$\pm 0,020$	$\pm 0,020$
m_5			$\pm 0,030$	$\pm 0,030$

2.3.2. Précision d'alignement

La précision d'alignement entre les motifs gravés sur deux niveaux de cuivre est estimée à $\pm 50 \mu\text{m}$ dans le cas d'une structure monocouche où les deux surfaces sont gravées. Dans le cas d'une structure multicouche l'alignement entre les motifs sur les deux surfaces est basé sur la position des via qui sont utilisés comme points de repère pour les gravures. La précision d'alignement entre les deux niveaux de cuivre où débouchent des via est également de l'ordre de $\pm 50 \mu\text{m}$.

L'augmentation du nombre de couches de substrats dans une structure stratifiée a tendance à dégrader la précision d'alignement. Cette dégradation est en partie induite par les procédures de pressage qui déforment la matière sous les effets de l'augmentation de température et de pression. Généralement, c'est au cours du premier pressage, donc que la première montée en température que la déformation du matériau est la plus importante. Il est donc recommandé d'assembler plusieurs couches de substrat en un seul et même pressage, afin que les déformations des matériaux soient homogènes entre les couches et donc garantir un meilleur alignement.

Les tables données en Figure III.7 fournissent les précisions d'alignement garanties entre les niveaux métallisés pour chaque structure stratifiée présentée en Figure III.4. Dans le cas de la structure 4C, la précision d'alignement entre le niveau de cuivre m_2 et les autres niveaux est difficile à prévoir du fait que la couche Sub_2 sur laquelle se trouve m_2 , n'est liée à aucune autre couche par une séquence de perçage, de plus elle se trouve dans la structure intercalée entre deux couches de prépeg qui vont être très déformées au cours du pressage. Cependant, le désalignement entre les niveaux m_1 et m_2 susceptible d'être induit par la déformation de la matière au cours du pressage est limité, car les couches de substrats Sub_1 et Sub_2 sont assemblées à la structure préalablement stratifiée $Sub_3 + Sub_4$ en un seul et même pressage.

	m_1	m_2
m_1	0	$\pm 0,05$
m_2		0

(a) - Structure 1C

	m_1	m_2	m_3
m_1	0	$\pm 0,10$	$\pm 0,05$
m_2		0	$\pm 0,05$
m_3			0

(b) - Structure 2C

	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
m_1	0	$\pm 0,05$	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$	$\pm 0,05$
m_2		0	$\pm 0,15$	$\pm 0,20$	$\pm 0,10$
m_3			0	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
m_4				0	$\pm 0,10$
m_5					0

(c) - Structure 3C

	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
m_1	0	?	$\pm 0,10$	$\pm 0,15$	$\pm 0,05$
m_2		0	?	?	?
m_3			0	$\pm 0,05$	$\pm 0,05$
m_4				0	$\pm 0,10$
m_5					0

(d) - Structure 4C

Figure III.7 - Tables des précisions d'alignement entre couches relatives à chaque structure stratifiée.

2.3.3. Impact des limites technologiques

L'impact des précisions de gravure (Δ_g) et d'alignement (Δ_l) entre les niveaux de cuivre a été évalué numériquement en termes de caractéristiques de bande passante (niveau d'adaptation, largeur de bande passante et décalage fréquentiel), d'impédance et de gain pour chaque réseau d'antennes présentés en Figure III.5 et Figure III.6.

■ Incertitude générée par la précision de gravure

Comme attendue, la tolérance de gravure a tendance à réduire l'impédance du réseau en cas de sur-gravure et à l'augmenter en cas de sous-gravure. Les variations d'impédance sont comprises entre 48Ω et $53,5 \Omega$ quel que soit le réseau d'antennes considéré. Cette tolérance peut engendrer des décalages de la bande de fréquences de l'ordre de ± 1 GHz dans le cas des réseaux A_1 , A_4 , As_1 et As_4 . Dans le cas des réseaux A_2 , A_3 , As_2 et As_3 les décalages de la bande passante peuvent dépasser 2 GHz (Tableau III.3), entraînant la désadaptation des réseaux A_2 et A_3 à la fréquence 60 GHz, les réseaux As_2 et As_3 sont eux en revanche toujours adaptés à cette fréquence en raison de leur bande passante plus large. L'impact sur les diagrammes de rayonnement des réseaux A_1 , A_4 , As_1 et As_4 est négligeable contrairement au cas des réseaux A_2 et As_2 pour lesquels la tolérance de gravure génère des variations du lobe de rayonnement arrière de ± 4 dB.

Tableau III.3 - Décalages fréquentiels de la bande passante des réseaux d'antennes générés par l'incertitude de gravure (GHz).

A_1	A_2	A_3	A_4	As_1	As_2	As_3	As_4
$\pm 0,8$	$\pm 2,7$	± 2	$\pm 1,1$	$\pm 0,8$	$\pm 2,1$	$\pm 2,1$	± 1

■ Incertitude induite par la précision d'alignement

L'impact de la précision d'alignement est très différent d'un type d'alimentation à l'autre et en fonction du nombre de couches de substrat dans les structures.

Dans le cas du réseau d'antennes As_1 , l'incertitude d'alignement impacte la largeur de la bande passante pouvant générer des variations de l'ordre de $\pm 0,4$ GHz. C'est aussi la bande passante qui est principalement affectée par la précision d'alignement dans le cas des réseaux A_2 et As_2 avec des variations respectives pouvant atteindre jusqu'à $\pm 1,3$ GHz et $\pm 2,1$ GHz. Dans le cas des réseaux A_4 et As_4 l'incertitude d'alignement peut générer une légère variation de la bande passante

des réseaux ($<0,5$ GHz) et un décalage fréquentiel de l'ordre de $\pm 0,7$ GHz. Ce sont les réseaux A_3 et As_3 qui sont le plus affectés par la précision d'alignement en raison de leurs empilements à trois ou bien quatre couches de substrat. Le niveau de coefficient S_{11} à 60 GHz est très affecté par les incertitudes d'alignement jusqu'à être complètement désadapté du fait d'un décalage de la bande passante vers les hautes fréquences de l'ordre de 2,2 GHz pour le réseau A_3 et jusqu'à 2,7 GHz pour le réseau As_3 .

▪ **Bilan**

L'analyse d'impacts des tolérances de gravure et d'alignement des couches de cuivre a mis en évidence que certains réseaux, en raison de leurs méthodes d'alimentation ou bien de leurs structures pouvaient y être plus sensibles.

C'est notamment le cas des réseaux A_2 , A_3 , As_2 et A_3 qui excitent les fentes permettant d'alimenter des antennes imprimées avec des arborescences d'alimentation en lignes imprimées. La position et les dimensions des lignes imprimées sous les fentes peuvent se révéler très critiques en cas d'imprécisions de gravure et d'alignement allant jusqu'à ce que les réseaux soient complètement désadaptés à 60 GHz.

3. Prototypes de réseaux d'antennes *off-body*

Dans cette section sont présentés les différents prototypes de réseaux d'antennes *off-body* réalisés. Leurs positionnements sur les schémas d'implantation des différentes séquences de réalisation sont détaillés et justifiés. Afin d'estimer les incertitudes de gravure, certaines des dimensions des motifs gravés sur les couches de cuivre non-enterrées après réalisation ont été mesurées au microscope binoculaire (Nikon Measuring Microscope MM-40) et comparées aux valeurs attendues après optimisation numérique (**Annexe B**). Dans les cas des réseaux d'antennes réalisés sur la structure 2C, les alignements entre les couches de cuivre ont pu être vérifiés au scanner à rayon X, lequel permet d'obtenir des vues superposées des couches de cuivre d'une structure où plusieurs des niveaux de cuivre comportent des gravures. Cette vérification n'est cependant pas possible dans le cas des réseaux d'antennes réalisés sur la structure 3C, en raison de couches de cuivre plus nombreuses et plus épaisses que dans la structure 2C.

3.1. Détails des prototypes réalisés

Dans la section 2 de ce chapitre nous avons montré que quatre séquençages de fabrication sont nécessaires pour réaliser l'ensemble des réseaux d'antennes étudiés et comparés dans le chapitre II. Or seuls les trois premiers séquençages, c'est-à-dire ceux relatifs aux structures 1C, 2C et 3C ont été réalisés aux cours des travaux de thèse, permettant d'obtenir huit prototypes de réseau d'antennes différents (Figure III.8), dont les dimensions sont détaillées en **Annexe B**.

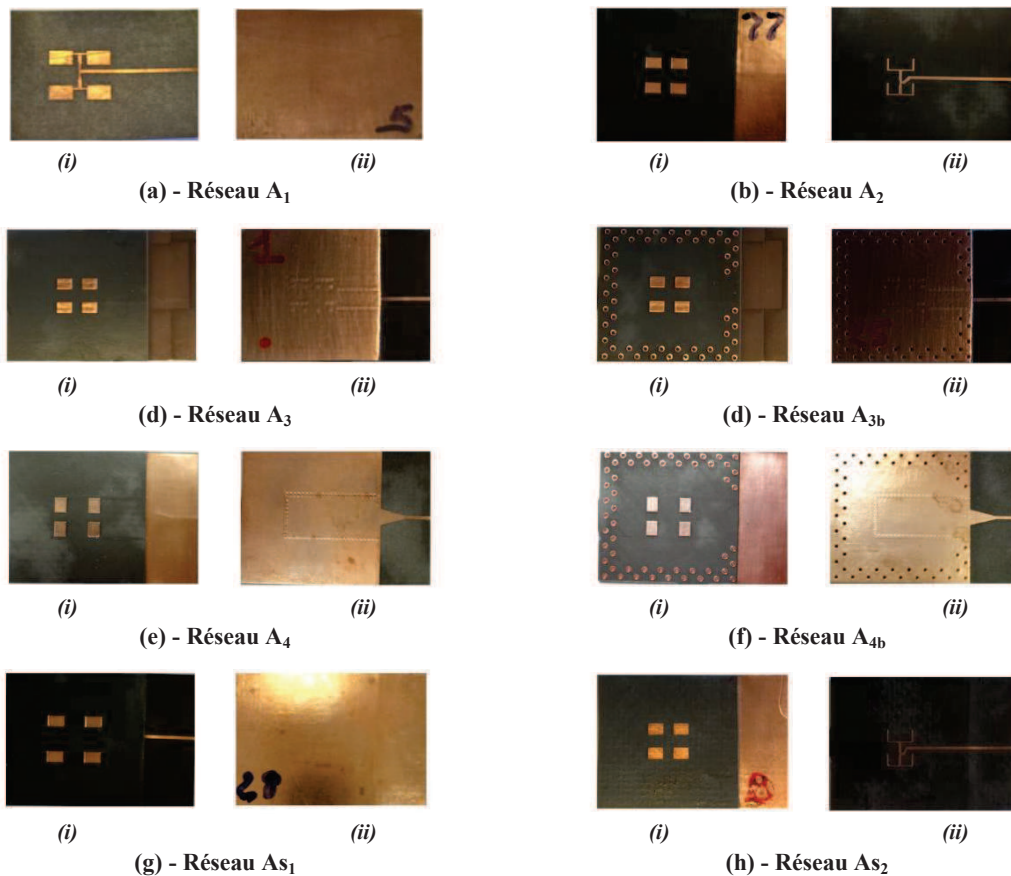


Figure III.8 - Prototypes des réseaux d'antennes 2×2 éléments 60 GHz réalisés. (i) Vue de la face avant et (ii) vue de la face arrière des structures.

En effet, on a fait le choix de ne pas lancer la procédure de fabrication de la séquence relative à la structure 4C nécessaire à la réalisation des réseaux As_3 et As_{3b} . Ce choix est justifié par plusieurs critères ; le premier concerne les précisions d'alignement entre les couches de la structure garanties qui ne sont pas satisfaisantes en vue de l'analyse d'impact réalisée (sous-section 2.2) ; le deuxième est la durée de fabrication estimée au moins à trois mois sans garantie d'avoir des prototypes mesurables en raison de la complexité de réalisation (ouverture mécanique et laser).

Les réseaux As_4 et As_{4b} n'ont également pas été réalisés au cours de la séquence 3C. En raison de la complexité de réalisation de la structure 3C (détaillée dans les paragraphes qui suivent) et de la forte sensibilité des performances des réseaux A_3 et A_{3b} aux imprécisions de gravure et d'alignement, les 2/3 des emplacements disponibles sur le plan d'implantation de la séquence 3C ont été attribués à la réalisation de ces deux réseaux.

3.2. Répartition et positionnement des prototypes sur les planches

3.2.1. Schéma d'implantation général des prototypes

Les prototypes des réseaux d'antennes multicouche sont réalisés sur des planches de substrat au format 228,5 mm \times 305 mm dont l'épaisseurs de cuivre de base est égale à 17 μ m. Sur ces planches seule une zone centrale de 160 mm \times 240 mm est disponible pour l'implantation des prototypes (Figure III.9), les bords de la planche sont utilisés par le prestataire pour la manipulation de la structure, les tests de gravure ou encore comme repères pour l'alignement et le centrage. Afin de pouvoir réaliser les pré-découpages des prototypes en fin de la séquence de fabrication, les prototypes sont écartés de 10 mm.

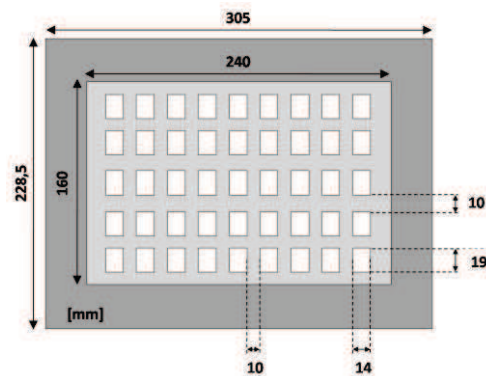


Figure III.9 - Schéma d'implantation des prototypes sur les planches de substrat 2C et 3C.

3.2.2. Agencement de la séquence de fabrication 2C

Le séquencage de fabrication 2C permet de réaliser les prototypes de quatre réseaux d'antennes différents en une même séquence, à savoir les prototypes des réseaux A_2 , A_4 , A_{4b} et As_1 . L'analyse d'impact de la précision d'alignement a montrée que les réseaux A_4 et A_{4b} étaient faiblement sensibles aux tolérances d'alignement au contraire du réseau A_2 , qui lui peut voir sa largeur de bande passante varier de $\pm 1,3$ GHz. Il a donc été choisi de positionner les prototypes des réseaux A_4 et A_{4b} aux emplacements sur les bords du schéma d'implantation, plus sujets aux désalignements entre couches (Figure III.10). Les prototypes des réseaux A_2 et As_1 sont eux

affectés aux emplacements centrés sur la planche afin d'être moins affectés par les désalignements au cours du pressage.

L'implantation (Figure III.10) décidée permet de réaliser 11 prototypes du réseau d'antennes A_2 , 12 prototypes du réseau A_4 ainsi que du réseau A_{4b} , et 10 du réseau As_1 . Dans cette procédure, la transition entre la ligne micro-ruban et la ligne micro-ruban enterrée de l'arborescence d'alimentation du réseau As_1 est un point particulièrement critique au cours de la procédure de réalisation, en raison d'un risque de rupture de la ligne imprimée. En effet, dans cette séquence les ouvertures donnant accès au niveau de cuivre m_2 sont réalisées dans les planches de substrat Sub_1 et de prépreg $Preg_1$ avant l'assemblage, nécessitant la mise en place de cales en téflon durant le pressage qui appuient sur les languettes.

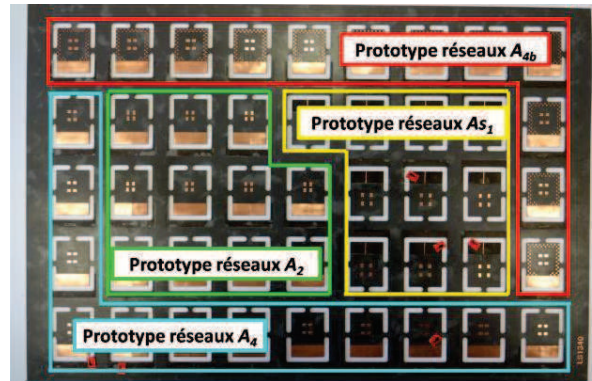


Figure III.10 - Schéma d'implantation de la séquence de fabrication des réseaux d'antennes sur la structure 2C.

3.2.3. Agencement de la séquence de fabrication 3C

Les prototypes des réseaux d'antennes A_3 , A_{3b} , As_2 , As_4 et As_{4b} peuvent en théorie être réalisés au cours d'une seule et même séquence de fabrication, la séquence 3C. Cependant comme nous l'avons déjà justifié précédemment, les prototypes As_4 et As_{4b} ont été écartés de l'implantation sur la planche afin de pouvoir réaliser plus de prototypes des réseaux A_3 et A_{3b} pour lesquels la réalisation est très complexe en raison de la nécessité d'un accès au plan de masse du niveau m_3 ainsi qu'à la ligne imprimée du niveau m_4 pour pouvoir connecter les prototype. Ces accès nécessitent deux d'ouvertures ; une première dans les couches de substrat Sub_3 et de prépreg $Preg_2$ avant assemblage qui va comme dans le cas du réseau As_1 d'accroître le risque de rompre la ligne imprimé au niveau de l'interface multicouches lors du pressage ; et une deuxième ouverture dans les couches de substrat Sub_1 et de prépreg $Preg_1$ après assemblage par ablation laser. Ce type d'ouverture est possible car le niveau m_3 est un plan de masse plein permettant d'arrêter le laser. Cependant pour assurer l'arrêt, l'épaisseur de cuivre du plan de masse doit-être supérieure à 25 μm . Ce critère d'arrêt a eu pour conséquence de nécessiter deux séries de fabrication, car dans la première l'épaisseur de 25 μm n'avait pas suffit à complètement stopper le laser, retirant de la matière dans la couche de substrat Sub_2 rendant inutilisable tous les prototypes A_3 et A_{3b} . Dans la deuxième procédure un renfort de cuivre supplémentaire de 8 μm a été ajouté pour garantir l'arrêt de l'ablation laser sur le cuivre du niveau m_3 . Ce renfort supplémentaire a un impact négligeable sur la précision de gravure d'après l'étude numérique.

Lors de la première série de fabrication l'agencement des prototypes des réseaux d'antennes A_3 , A_{3b} et As_2 a permis de réaliser pour chacun 15 prototypes. Les réseaux étant quasiment tous aussi sensibles aux désalignements, une implantation par bandes de 5 prototypes alternant chaque réseau a été choisi. Ce type d'implantation a été conservé lors de la seconde série de fabrication, en revanche les emplacements des prototypes du réseau As_2 ont été occupés par ceux des réseaux

A_3 et A_{3b} (Figure III.11). En effet, au cours de la première série, les prototypes du réseau A_{S_2} ne nécessitaient qu'une seule ouverture entre les niveaux m_2 et m_3 réalisée mécaniquement avant assemblage et non par laser.

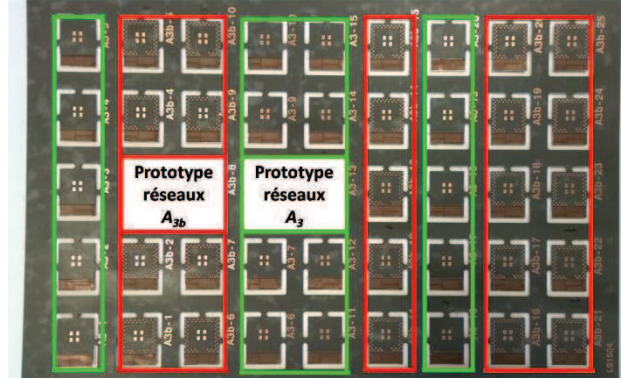


Figure III.11 - Schéma d'implantation de la séquence de fabrication des réseaux d'antennes sur la structure 3C (série de fabrication 2).

3.3. Estimation des précisions de gravure et d'alignement

3.3.1. Séquence de fabrication 1C

Au cours de cette séquence de fabrication 1C, seul les prototypes des réseaux d'antennes A_1 sont réalisés. La précision d'alignement n'intervient pas dans cette structure où on trouve uniquement des motifs imprimés sur la couche m_1 , la couche m_2 étant un plan de masse plein. C'est donc la tolérance de gravure du laser qui est susceptible d'impacter les performances des prototypes du réseau d'antennes A_1 .

Certaines dimensions des motifs imprimés sur le niveau de cuivre m_1 ont été mesurées sous lunettes binoculaires et comparées aux valeurs attendues ([Annexe C](#)). La comparaison aux valeurs optimisées avec le modèle numérique du réseau A_1 a montré des écarts moyens compris entre 0 mm et +0,017 mm, c'est-à-dire respectant la tolérance annoncée dans le Tableau III.2 de $\pm 0,020$ mm.

3.3.2. Séquence de fabrication 2C

Deux couches de substrat de même épaisseur, à savoir les plus fines disponible dans la gamme standard pour le RT/duroid 5880, sont empilées au cours de la séquence de fabrication 2C par pressage. Ce pressage est susceptible de provoquer les désalignements estimés en section 2 (Figure III.7). En raison de la faible épaisseur de la structure 2C globale, il nous a été possible d'estimer les désalignements entre couche des réseaux d'antennes A_2 , A_4 , A_4 et A_{S_1} à partir de vues superposées des niveaux de cuivre obtenues avec un scanner à rayon X (Figure III.12).

Dans le cas des prototypes des réseaux A_4 et A_{4b} , des désalignements de l'ordre de $\pm 0,090$ mm ont été évalués à partir des vues superposées entre les couches de cuivre m_1 et m_2 . Pour les prototypes des réseaux A_2 et A_{S_1} , ce sont des désalignements plus faibles de l'ordre de $\pm 0,070$ mm qui ont été estimés entre les niveaux m_1 et m_2 de cuivre. Les valeurs des désalignements semblent donc inférieures à la tolérance de $\pm 0,100$ mm fixée entre les niveaux m_1 et m_2 (Figure III.12b).

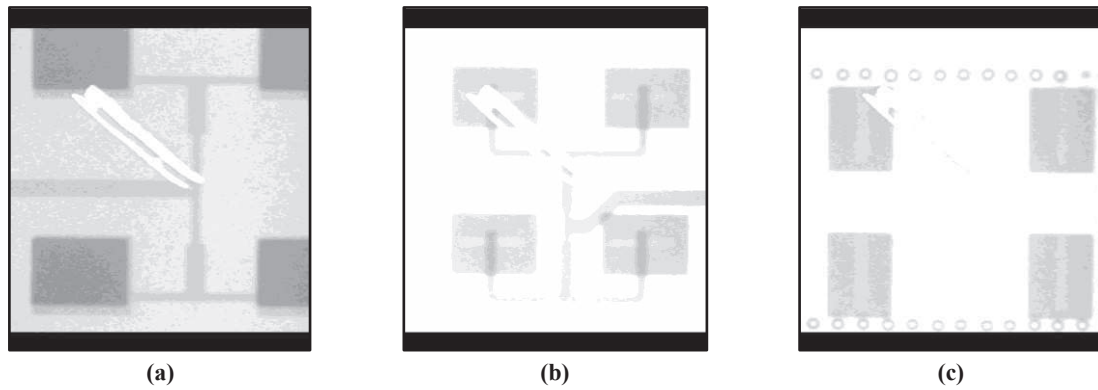


Figure III.12 - Vues superposées des couches métalliques de la structure 2C par rayon X : (a) réseau As_1 , (b) réseau A_2 et (c) réseau A_4 .

Comme pour les prototypes du réseau d'antennes A_1 , certaines des dimensions des motifs présents sur les niveaux de cuivre accessibles des prototypes A_2 , A_4 , A_{4b} et As_1 sont mesurées sous microscope binoculaire. Dans le cas des prototypes du réseau A_2 les déviations maximales avec les dimensions attendues sont comprises entre -0,028 mm et +0,017 mm sur la couche de cuivre m_1 et entre -0,019 mm et +0,014 mm sur la couche m_3 . Pour les prototypes A_4 et A_{4b} les imprécisions de gravure sont respectivement comprises entre -0,021 mm et +0,012 mm ou bien entre -0,020 mm et +0,019 mm sur la couche de cuivre m_1 , et entre +0,009 mm et +0,027 mm ou bien entre -0,007 mm et +0,024 mm sur la couche m_3 . En ce qui concerne les prototypes des réseaux As_1 , les écarts avec les valeurs attendues sont compris entre -0,027 mm et +0,020 mm sur la couche de cuivre m_1 et sont de l'ordre de 0,005 mm sur la couche m_2 .

Les imprécisions sont inférieures à $\pm 0,030$ mm quelle que soit la couches vérifiée et le réseau d'antennes à la structure 2C, ce qui semble montrer que les tolérances de gravure annoncées ont été respectées.

3.3.3. Séquence de fabrication 3C

La séquence de fabrication 3C permet d'assembler trois couches de substrat d'épaisseur différentes en deux pressages. Comme dans le cas de la structure 2C, ces assemblages sont susceptibles de générer des désalignements entre les motifs gravés sur les différents niveaux de cuivre. Or, contrairement aux prototypes sur la structure 2C, il n'est pas possible d'estimer la précision d'alignement entre les niveaux de cuivre des réseaux d'antennes 3C. En effet la structure 3C est plus épaisse (815 mm contre 344 mm pour la structure 2C) et les niveaux de métallisation sont plus nombreux ainsi que plus épais, ne permettant pas d'avoir suffisamment de contraste pour obtenir des vues superposées par scanner à rayon X.

Comme pour les réseaux d'antennes réalisés au cours des séquences 1C et 2C, il est possible d'évaluer la précision de gravure à partir de mesures de certaines dimensions de gravure sur les faces cuivrées accessibles des réseaux A_3 , A_{3b} et As_2 par mesure avec le microscope binoculaire. Pour les prototypes des réseaux d'antennes A_3 et A_{3b} les déviations maximales avec les dimensions attendues sont comprises entre -0,022 mm et +0,025 mm ou bien entre -0,027 mm et +0,035 mm sur le niveau de cuivre m_1 et sont comprises entre -0,012 mm et +0,012 mm ou bien entre -0,030 mm et -0,020 mm sur le niveau de cuivre m_4 . Dans le cas des prototypes du réseau As_2 , les déviations sont comprises entre -0,063 mm et +0,006 mm sur le niveau de cuivre m_1 et entre -0,055 mm et +0,057 mm sur le niveau de cuivre m_5 . Les incertitudes dans le cas du réseau As_2 dépassent très largement les tolérances annoncées de $\pm 0,030$ mm sur les niveaux de cuivre m_1 et

m_5 . Les images présentées en Figure III.13 montrent les irrégularités des gravures sur les niveaux de cuivre accessibles, plus particulièrement visibles sur le niveau m_1 (Figure III.13a).

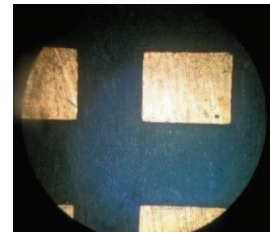
(a) - Niveau m_1 (b) - Niveau m_5

Figure III.13 - Images des gravures sur les couches accessibles réseau d'antennes A_2 obtenues avec le microscope binoculaire.

3.3.4. Bilan

Les imprécisions de gravure ont été estimées sur chaque niveau de métallisation accessible post-réalisation par mesure avec le microscope binoculaire pour chaque prototype de réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz dont les performances expérimentales sont analysées dans la section qui suit. La comparaison des imprécisions de gravure mesurées qui sont résumées dans le Tableau III.4, aux tolérances annoncées et détaillées dans le Tableau III.2 révèle que quel que soit le prototype de réseaux d'antennes, les tolérances sont globalement respectées pour les dimensions qui ont été vérifiées par mesures sous lunettes binoculaires.

Dans le cas du prototype du réseau d'antennes A_1 , l'imprécision de gravure est comprise dans l'intervalle $\pm 0,020$ mm et respecte donc la tolérance annoncée avant réalisation. Pour les réseaux A_2 , A_4 et A_{4b} réalisés au cours de la séquence 2C, la tolérance de gravure sur les niveaux de cuivre m_1 et m_3 qui est fixée à $\pm 0,030$ μ m est aussi bien respectée, de même que celle sur le niveau m_2 du réseau As_1 fabriqué au cours de la même séquence. Pour les réseaux A_3 et A_{3b} la précision de gravure annoncée est respectée, en revanche ce n'est pas le cas du réseau d'antenne As_2 qui a été fabriqué au cours d'une première série de fabrication.

Tableau III.4 - Imprécisions de gravure mesurées sur les niveaux de cuivre accessibles de différents prototypes de réseaux d'antennes *off-body* en mm.

	Niveaux de métallisation									
	m_1		m_2		m_3		m_4		m_5	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
A_1	0	+0,017	∅	∅						
A_2	-0,028	+0,017	∅	∅	-0,019	+0,014				
A_3	-0,022	+0,025	∅	∅	∅	∅	-0,012	+0,012	∅	∅
A_{3b}	-0,027	+0,035	∅	∅	∅	∅	-0,030	-0,020	∅	∅
A_4	-0,021	+0,012	∅	∅	+0,009	+0,027				
A_{4b}	-0,020	+0,019	∅	∅	-0,007	+0,024				
As_1	-0,027	+0,020	0,000	+0,005	∅	∅				
As_2	-0,063	+0,006	∅	∅	∅	∅	∅	∅	-0,055	+0,057

∅ : Imprécision de gravure non-mesurable sur le prototype

En ce qui concerne la précision d'alignement des différents prototypes des réseaux d'antennes réalisés sur la structure 2C, les désalignements estimés entre les couches m_1 et m_2 de la structure multicouche à partir des images obtenues par scanner à rayon X sont conformes à la tolérance annoncée de $\pm 0,100$ mm.

4. Performances expérimentales des prototypes

Dans cette section, on s'intéresse uniquement aux performances expérimentales des réseaux non-empilés. En effet, en raison de la non réalisation des réseaux d'antennes AS_3 , AS_{3b} , AS_4 et AS_{4b} nous avons choisi de concentrer la présentation et l'analyse des performances expérimentales sur les réseaux A_1 , A_2 , A_3 , A_{3b} , A_4 et A_{4b} .

Dans les sous-sections qui suivent, les performances antennaires expérimentales obtenues pour les différents prototypes de réseaux d'antennes en espace libre et en présence d'un fantôme équivalent de la peau sont analysées et comparées en termes d'adaptation et de rayonnement. Ces performances expérimentales sont également comparées aux résultats des modèles numériques équivalents optimisés sous CST MWS. Précisons aussi que la stabilité des performances en rayonnement est analysée en terme de diagrammes et de gain sur la bande 59-61 GHz.

4.1. Matériels et méthodes

4.1.1. Modèle numérique

Les performances numériques auxquelles sont comparés les résultats expérimentaux sont obtenues à partir de modèles numériques équivalents. Dans ces modèles, des couches absorbantes parfaites (PML) sont définies comme conditions aux frontières de simulation ; des maillages locaux sont utilisés pour les éléments des réseaux d'antennes (avec des mailles aux dimensions maximales $\lambda_g/25$), mais aussi dans l'épaisseur du fantôme équivalent (avec des mailles aux dimensions $\lambda_g/50$ entre la surface exposée et la profondeur 0,5 mm).

Un modèle numérique équivalent réaliste du connecteur en bande V de mesure nécessaire pour relier l'arborescence d'alimentation des réseaux d'antennes aux appareils de mesure a été développé. Ce modèle est utilisé afin de mieux prendre en compte l'impact de la présence du connecteur sur l'adaptation et le rayonnement des réseaux d'antennes, et ainsi assurer un meilleur accord entre simulation et mesure (Figure III.14).

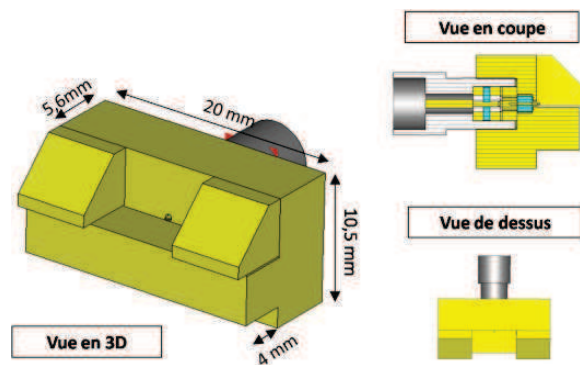


Figure III.14 - Modèle numérique du connecteur de mesure en bande V.

4.1.2. Appareils de mesure

▪ Mesures des niveaux du module S_{11}

Les niveaux du module S_{11} des prototypes des réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz ont été mesurés sur la bande de fréquence 55-65 GHz avec un analyseur de réseau Agilent (N5227A PNA Network Analyzer 10 MHz – 67 GHz). Au préalable des mesures, une calibration « Full

« One-Port » a été réalisée à l'aide de trois éléments : un circuit-ouvert, un court-circuit et une charge 50Ω . Ces trois éléments ont été connectés à l'extrémité du câble et mesurés. Leur mesure permet d'établir la matrice d'erreur qui est appliquée aux mesures réalisées avec les prototypes montés sur le connecteur V. Les niveaux du module S_{11} sont mesurés à l'entrée du connecteur et non à l'entrée du réseau d'antennes.

▪ Mesures des performances en rayonnement

Les performances en rayonnement des prototypes de réseaux d'antennes sont mesurées dans la chambre anéchoïque millimétrique champ lointain de l'IETR en diagramme et en gain sur une bande de fréquence allant de 55 GHz à 61 GHz avec un pas de 1 GHz pour les diagrammes et de 0,25 GHz pour le gain. Les diagrammes de rayonnement dans les plans E et H et le gain des réseaux d'antennes sont mesurés en espace libre (Figure III.15a) et en présence du fantôme équivalent (Figure III.15b).

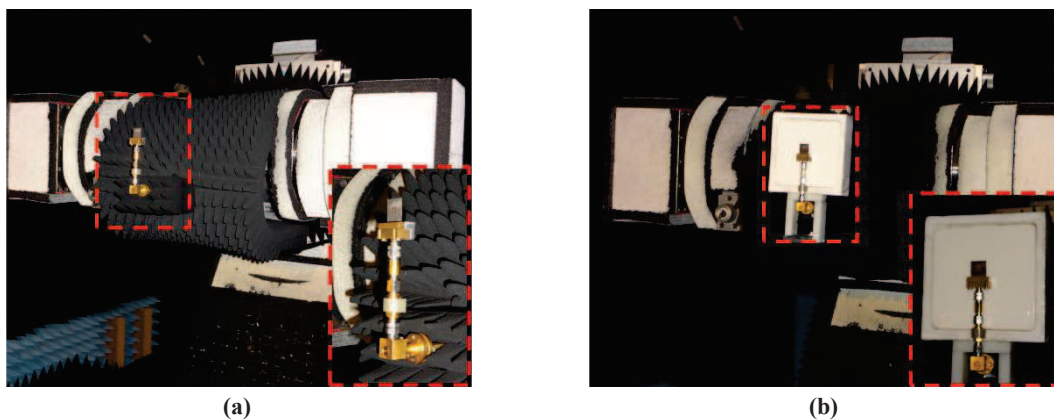


Figure III.15 – Dispositif de mesure en chambre anéchoïque des prototypes des réseaux d'antennes (a) en espace libre et (b) sur le fantôme équivalent.

Le gain expérimental des prototypes est évalué avec une méthode comparative utilisant une antenne cornet standard 20 dBi sur la bande 50-70 GHz. Cette méthode consiste à faire la différence entre le gain connu du cornet étalon et le niveau mesuré pour le cornet à une même fréquence. Cette différence est ensuite additionnée aux niveaux mesurés pour les différents prototypes. La mesure référence avec le cornet est schématisée en Figure III.16a, et celle avec les prototypes en Figure III.16b. Les pertes liées à la connectique (transitions) entre le guide d'onde et le connecteur V ont été estimées par mesure du coefficient de transmission avec l'analyseur de réseaux Agilent à 1,1 dB ($\pm 0,2$ dB) sur la bande 55-61 GHz. Cette estimation de la valeur des pertes induites par la connectique est aussi à additionner aux niveaux mesurés pour les prototypes.

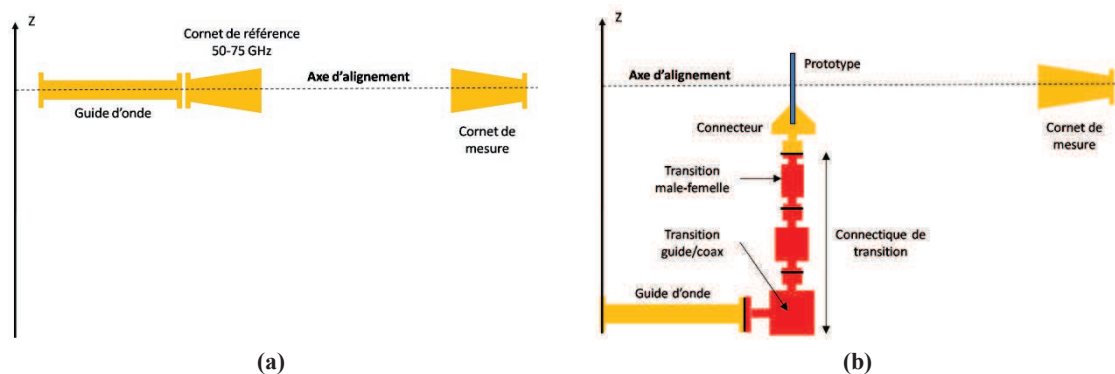


Figure III.16 - Schémas des configurations de mesure en chambre anéchoïque millimétrique : (a) mesure de référence avec cornet 50-70 GHz et (b) mesure des prototypes de réseaux d'antennes 60 GHz.

4.1.3. Description des conditions d'exposition

Les performances des réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz en présence du corps humain ont été estimées numériquement et expérimentalement en utilisant un fantôme émulant les propriétés diélectriques de la peau humaine à 60 GHz [4]. La composition et la procédure de fabrication du fantôme sont détaillées en [Annexe A](#). Le fantôme utilisé dans les modèle numériques ou bien en mesure est un parallélépipède planaire aux dimensions 100 mm \times 100 mm \times 15 mm.

La position des réseaux d'antennes montés sur connecteur V en présence du fantôme est schématisée en Figure III.17. Le schéma montre que le centre de réseau d'antennes est centré sur la surface du fantôme (Figure III.17a), et que connecteur est posé sur la surface fantôme (Figure III.17b). Cette configuration impose un gap d'air h de l'ordre de 4,5 mm.

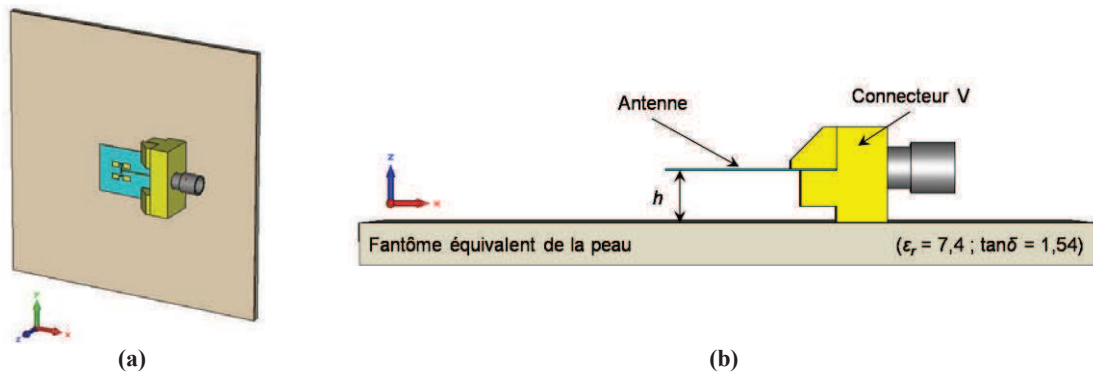


Figure III.17 - Position du réseau d'antennes monté sur le connecteur de mesure en bande V en présence du fantôme équivalent. (a) Vu en perspective 3D et (b) vue de profil.

4.2. Adaptation des prototypes sur la bande 55-65 GHz

Dans cette sous-section, les niveaux du module du coefficient de réflexion S_{11} mesurés ou simulés en espace libre et en présence du fantôme équivalent sont analysés et comparés sur la bande de fréquence 55-65 GHz, pour chaque réseau d'antennes (Figure III.18). Les bandes de fréquence sur lesquelles le module du coefficient de réflexion S_{11} est inférieur à -10 dB sont identifiées par des bandes de couleur sur les courbes.

4.2.1. Prototype du réseau d'antennes A_1

En simulation, le module S_{11} du réseau d'antennes A_1 est adapté à -10 dB sur une bande de fréquence large de 3,1 GHz allant de 57,9 à 61 GHz. Le module S_{11} mesuré pour le prototype du réseau A_1 est lui inférieur à -10 dB sur une bande de fréquence comprise entre 57,9 et 61,9 GHz soit une bande large de 4 GHz (Figure III.18a).

La comparaison des courbes de S_{11} simulées et mesurées expérimentalement en espace libre à celles en présence du fantôme distant de $h = 4,5$ mm, montrent que ce dernier n'a pas d'impact sur l'adaptation du réseau A_1 pour cet écartement. En effet, aucune différence en termes de largeur bande passante ou bien de niveau d'adaptation n'est notable.

4.2.2. Prototype du réseau d'antennes A_2

Le module S_{11} du réseau d'antennes A_2 est adapté à -10 dB sur une bande de fréquence large de 4,3 GHz allant de 57,4 à 61,7 GHz en simulation. En mesure cette bande est légèrement plus large (4,7 GHz) et décalée vers les basses fréquences d'environ 1 GHz (55,7-60,9 GHz) (Figure III.18b).

Contrairement au réseau d'antennes A_1 , le module S_{11} du réseau A_2 est légèrement affecté par la présence du fantôme équivalent même distant de $h = 4.5$ mm (Figure III.18b). Cependant, les largeurs ou bien les positions des bandes passantes numériques et expérimentales ne sont pas modifiées de façon majeure en raison de l'écart h élevé.

4.2.3. Prototype du réseau d'antennes A_3

Le réseau d'antennes A_3 est adapté numériquement avec un module S_{11} inférieur à -10 dB sur une bande de fréquence s'étalant de 58,1 GHz à 62,1 GHz soit 4 GHz de largeur de bande. Expérimentalement, la bande mesurée est quasiment aussi large avec 3,8 GHz compris entre 57,1 GHz et 60,9 GHz, mais elle est décalée vers les basses fréquences d'environ 1 GHz (Figure III.18c). Notons que comme pour le réseau A_1 , le réseau A_3 est très faiblement impacté par la présence du fantôme équivalent.

4.2.4. Prototype du réseau d'antennes A_{3b}

L'adaptation du module S_{11} à -10 dB obtenue numériquement ou expérimentalement pour le réseau d'antennes A_{3b} est semblable à celle du réseau A_3 (Figure III.18d). En effet, le module S_{11} évalué numériquement est inférieur à -10 dB entre 58,2 GHz et 62,1 GHz soit 3,9 GHz de bande passante, en mesure le module S_{11} est inférieur à -10 dB entre 57,2 GHz et 60,8 GHz soit 3,6 GHz de bande. De plus comme pour le réseau d'antennes A_3 la présence du fantôme impact faiblement le réseau A_{3b} .

4.2.5. Prototype du réseau d'antennes A_4

Dans le cas du réseau d'antennes A_4 la bande passante à -10 dB calculée numériquement est plus large que celle mesurée de 2,1 GHz (Figure III.18e). En effet, en simulation le réseau A_4 est adapté sur une bande de 4,5 GHz s'étalant de 56,8 GHz à 61,4 GHz, en mesure le module S_{11} du prototype est inférieur à -10 dB seulement entre 58,6 GHz et 61,4 GHz soit 2,3 GHz. En revanche, dans les deux cas l'adaptation est peu sensible à la présence du fantôme.

4.2.6. Prototype du réseau d'antennes A_{4b}

En ce qui concerne l'adaptation du réseau d'antennes A_{4b} (Figure III.18f), les observations sont équivalentes à celles faites pour le réseau A_4 . La largeur de la bande de fréquence sur laquelle le module S_{11} est adapté en dessous de -10 dB est toujours inférieure en mesure de 2,1 GHz à celle simulée. En simulation la bande s'étale entre 56,8 – 61,3 GHz soit 4,5 GHz alors qu'en mesure la bande se cantonne à 2,4 GHz compris entre 58,9 – 61,3 GHz. Le réseau d'antennes A_{4b} est lui aussi quasi-insensible à la présence du fantôme.

4.2.7. Bilan

L'analyse des courbes du module du coefficient de réflexion S_{11} mesurées sur la bande 55-65 GHz pour les réseaux d'antennes *off-body* réalisés A_1 , A_2 , A_3 , A_{3b} , A_4 et A_{4b} , a montré une adaptation quel que soit le réseau à 60 GHz inférieure à -10 dB.

La comparaison des courbes expérimentales du module S_{11} avec celles calculées numériquement a révélé des différences importantes (Tableau III.5). Dans le cas du réseau d'antennes A_1 , la bande mesurée à -10 dB est plus large que celle simulée de 1 GHz en direction des hautes fréquences. En ce qui concerne les réseaux A_2 , A_3 et A_{3b} les largeurs des bandes adaptées à -10 dB sont équivalentes à celles obtenues numériquement, en revanche les bandes sont décalées d'environ 1 GHz vers les basses fréquences. Pour les réseaux A_4 et A_{4b} le niveau d'adaptation à -10 dB est fortement dégradé en mesure par rapport aux résultats numériques. En effet, les prototypes des réseaux A_4 et A_{4b} sont au mieux adaptés à -10 dB sur une bande de fréquence réduite par un facteur de quasiment 2 par rapport à celles calculées numériquement.

Du fait de l'écartement h important utilisé lors des mesures entre les réseaux d'antennes et la surface du fantôme, la présence de ce dernier n'a quasiment pas d'impact sur le niveau d'adaptation à -10 dB des prototypes. A l'exception du réseau d'antennes A_2 dont les niveaux du module S_{11} sont légèrement dégradés sur la bande en raison de l'arborescence d'alimentation en face arrière.

Tableau III.5 – Caractéristiques numériques et expérimentales des bandes passantes des réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz.

Réseaux d'antennes		Fréquence basse (GHz)	Fréquence haute (GHz)	Bande ($S_{11} < -10$ dB) (GHz)
A_1	Numérique	57,9	61,0	3,1
	Expérimental	57,9	61,9	4,0
A_2	Numérique	57,4	61,7	4,3
	Expérimental	55,7	60,4	4,7
A_3	Numérique	58,1	62,1	4,0
	Expérimental	57,1	60,9	3,8
A_{3b}	Numérique	58,2	62,1	3,9
	Expérimental	57,2	60,8	3,6
A_4	Numérique	56,8	61,4	4,6
	Expérimental	58,6	60,9	2,3
A_{4b}	Numérique	56,8	61,3	4,5
	Expérimental	58,9	61,3	2,4

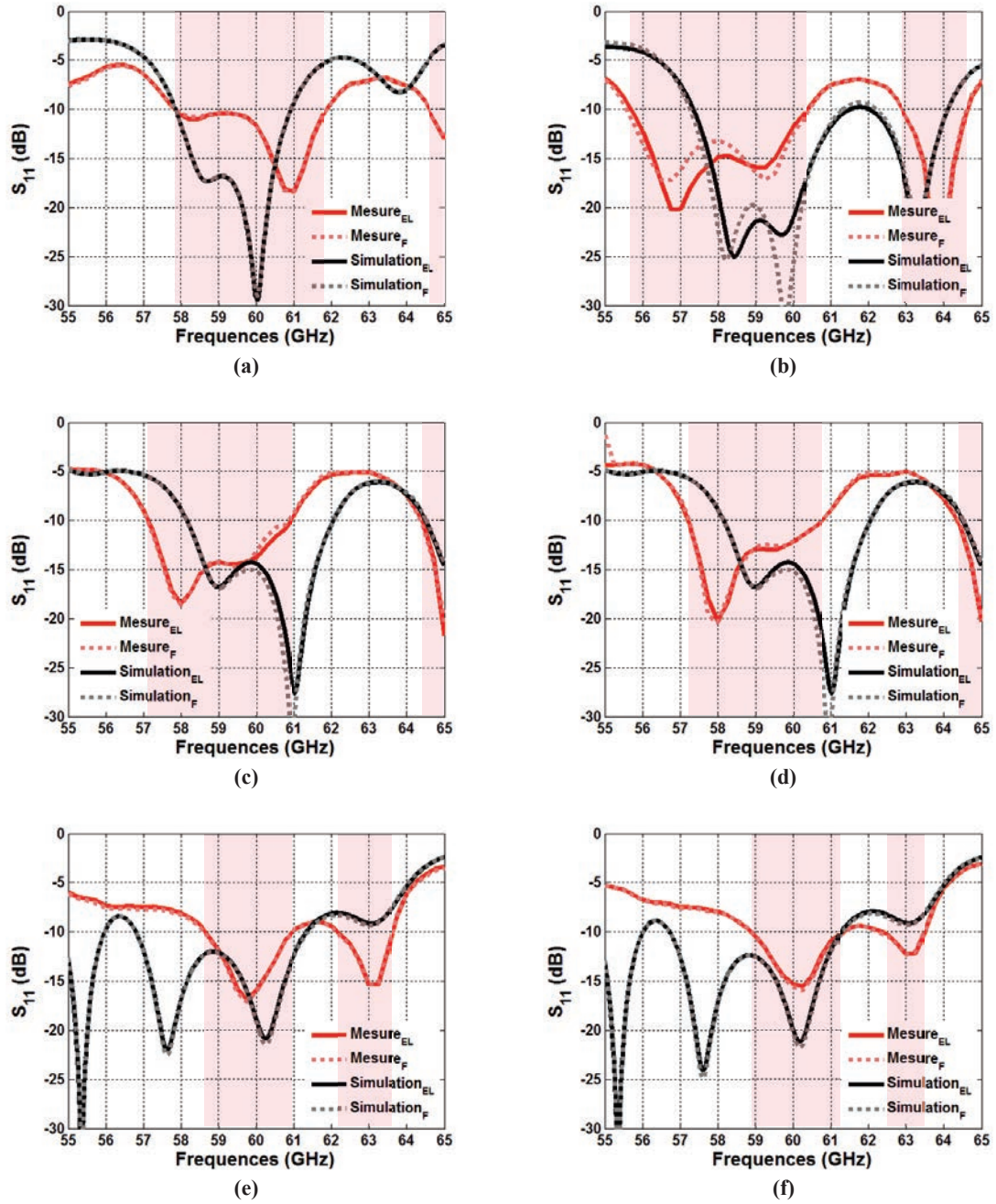


Figure III.18 - Coefficient de réflexion S_{11} mesuré et simulé sur la bande 55-65 GHz (—) en espace libre et (· · ·) en présence du fantôme équivalent. (a) réseau A_1 , (b) réseau A_2 , (c) réseau A_3 , (d) réseau A_{3b} , (e) réseau A_4 et (f) réseau A_{4b} .

4.3. Résultats en rayonnement

Dans cette sous-section, la stabilité des modèles de rayonnement sur la bande 59-61 GHz est analysée pour chaque réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz. Le choix de cette bande est lié aux mesures du coefficient de réflexion (Figure III.18) qui montrent que le niveau du module S_{11} est inférieur ou quasi-inférieur à -10 dB à ces fréquences quel que soit le réseau d'antennes. Les modèles expérimentaux sont ensuite comparés aux résultats obtenus numériquement en espace libre à 60 GHz. Puis les résultats expérimentaux en présence du fantôme sont analysés pour les conditions d'expositions illustrées par la Figure III.17.

Dans les paragraphes qui suivent les diagrammes de rayonnement normalisés mesurés dans les plans E et H des prototypes de réseaux d'antennes sont présentés et commentés en espace libre à 59 GHz, 60 GHz et 61 GHz. L'étude des interactions entre le rayonnement des prototypes et le fantôme équivalent est uniquement présentée à 60 GHz. Précisons qu'afin d'éviter les redondances d'information les modèles de rayonnement des réseaux d'antennes blindés A_{3b} et A_{4b} ne sont pas détaillés du fait de leurs similitudes avec respectivement les réseaux A_3 et A_4 .

4.3.1. Prototype du réseau d'antennes A_I

▪ Stabilité du modèle de rayonnement sur la bande 59-61 GHz

Les superpositions des diagrammes de rayonnement mesurés en faces avant et arrière à 59 GHz, 60 GHz et 61 GHz pour le réseau d'antennes A_I sont présentées en Figure III.19.

La forme du lobe principal de rayonnement du réseau d'antennes A_I est stable sur la bande 59-61 GHz quel que soit le plan du modèle de rayonnement comme on peut le constater avec les Figure III.19a et Figure III.19b. Cependant, des variations des niveaux des lobes secondaires de rayonnement sont à noter dans les deux plans : dans le plan E, le niveau du lobe secondaire entre 50° et 90° (Figure III.19a) passe de -7,8 dB à 59 GHz à -9,4 dB à 61 GHz ; dans le plan H, le niveau du lobe secondaire entre -90° et -50° (Figure III.19b) varie de -17,5 dB à 59 GHz, à -11,1 dB à 61 GHz. Des variations sont aussi observées entre les niveaux de polarisation croisée, laquelle a tendance à diminuer avec l'augmentation de la fréquence des diagrammes de rayonnement mesurés : dans le plan E le niveau de polarisation croisée passe de -11,8 dB à 59 GHz à -18,7 dB à 61 GHz à 0° ; dans le plan H le niveau est de -11,6 dB à 59 GHz à -17,1 dB à 61 GHz à 0° .

L'analyse des Figure III.19c et Figure III.19d montre que les lobes de rayonnement arrière du réseau d'antennes A_I présentent un bon accord en termes de forme et de niveau de rayonnement quelle que soit la fréquence.

▪ Comparaison entre simulation et mesure à 60 GHz

La comparaison des diagrammes de rayonnement simulés et mesurés en espace libre à 60 GHz en Figure III.20a montrent un très bon accord dans le plan E pour le lobe de rayonnement principal, les lobes secondaires sont légèrement plus élevés en mesure qu'en simulation, avec un niveau maximal à -6,2 dB en mesure autour de 58° contre -8,2 dB en simulation autour de -60° . Dans le plan H (Figure III.20b), le rayonnement avant est plus chahuté en raison de la présence du connecteur de mesure dans ce plan, qui génère une remontée importante du niveau de la polarisation croisée, entre -90° et 0° atteignant -8,6 dB en mesure et seulement -25 dB en simulation. En dépit des effets liés au connecteur un accord satisfaisant est observé entre les

résultats numériques et expérimentaux dans ce plan en termes de forme et de niveau de rayonnement.

En ce qui concerne les diagrammes de rayonnement arrière, un très bon accord en termes de forme et de niveau de rayonnement est observé dans les plans E et H, avec un rayonnement arrière dans la direction 0° inférieur de -20 dB par rapport au niveau du lobe principal de rayonnement.

▪ Impact du fantôme équivalent à 60 GHz

Le fantôme équivalent de la peau humaine a peu d'impact sur le rayonnement avant du réseau d'antennes A_1 (Figure III.20a et b). En effet, les diagrammes de rayonnement dans les plans E et H montrent un très bon accord entre les mesures en espace libre et en présence du fantôme. En revanche, comme attendu le niveau de rayonnement arrière est impacté en présence du fantôme (Figure III.20c et d). Suivant 0° , le niveau de rayonnement arrière est de l'ordre -22 dB en espace libre et de -35 dB en présence du fantôme. Entre les directions -45° et 45° les niveaux de rayonnement arrière en espace libre ne dépassent pas -16 dB dans le plan H, en présence du fantôme les niveaux plafonnent à -21 dB. Il est important de remarquer qu'entre -45° et -90° , ainsi qu'entre 45° et 90° les niveaux de rayonnement arrière ont tendance à augmenter dans le plan E en raison des lobes de rayonnement secondaires (Figure III.20c).

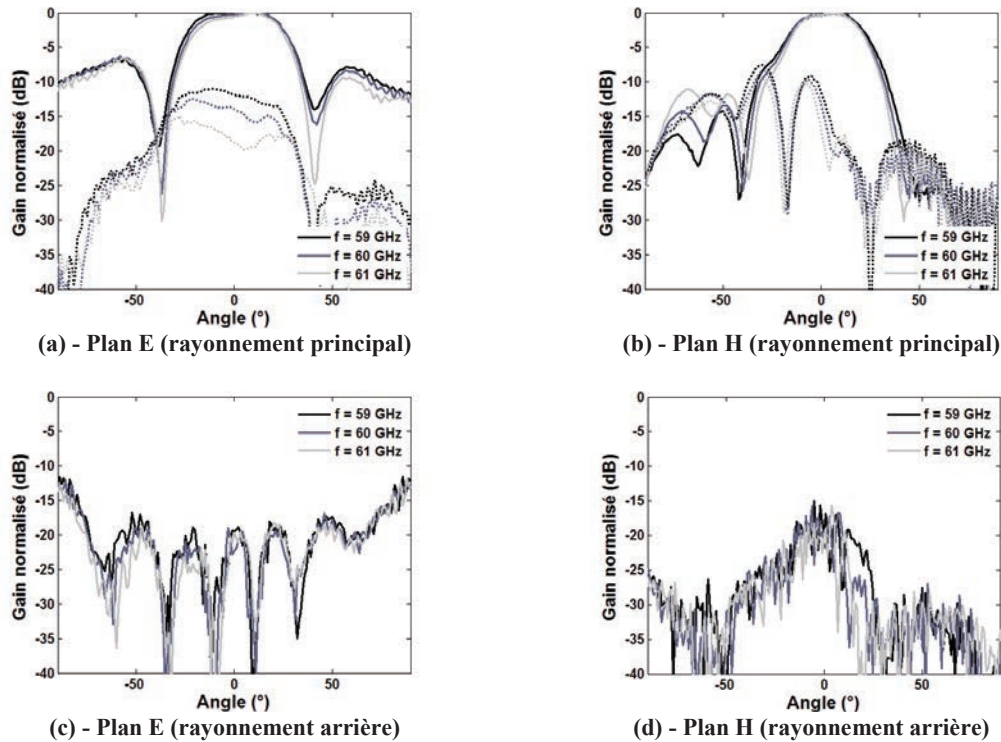


Figure III.19 - Diagrammes de rayonnement du réseau A_1 mesurés en espace libre entre 59 GHz et 61 GHz : (—) co-polarisation et (---) polarisation croisée.

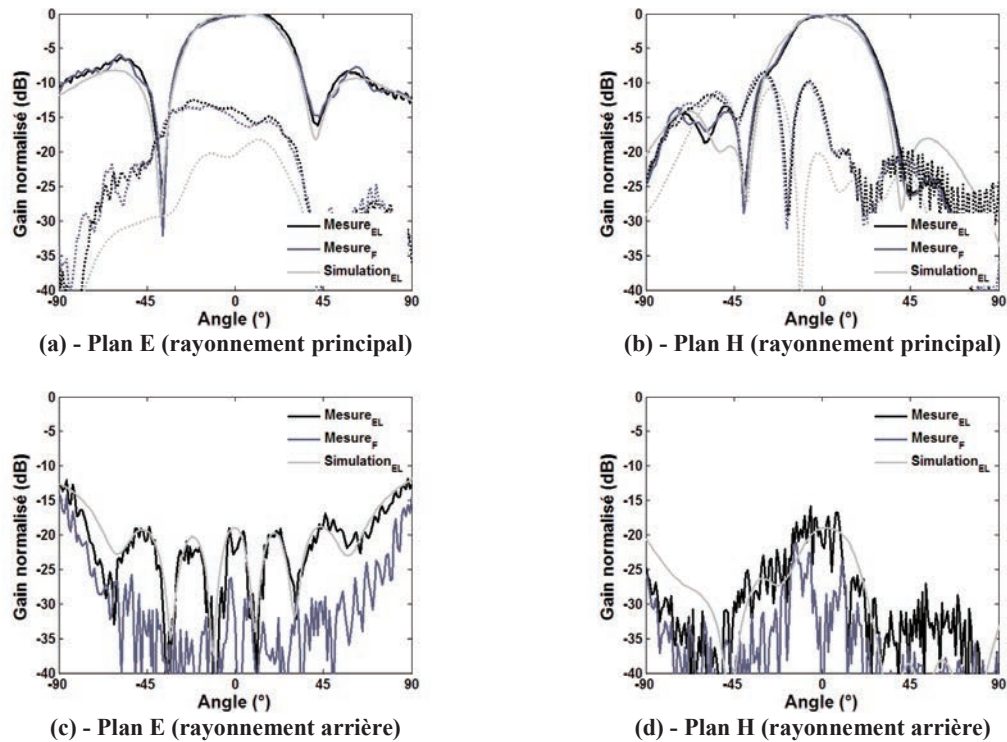


Figure III.20 - Diagrammes de rayonnement du réseau A_1 mesurés et simulés à 60 GHz en espace libre et en présence du fantôme équivalent : (—) co-polarisation et (---) polarisation croisée.

4.3.2. Prototype du réseau d'antennes A_2

■ Stabilité du modèle de rayonnement sur la bande 59-61 GHz

La comparaison des diagrammes de rayonnement avant mesurés pour le réseau d'antennes A_2 sur la bande de fréquence 59-61 GHz montre un très bon accord dans les plans E et H (Figure III.21a et b), aussi bien en termes de polarisation principale que de polarisation croisée. En revanche, les niveaux de rayonnement arrière sont eux légèrement différents (Figure III.21c et d), le niveau du lobe de rayonnement arrière entre -50° et 50° a tendance diminuer lorsque la fréquence augmente.

■ Comparaison entre simulation et mesure à 60 GHz

Les diagrammes de rayonnement avant et arrière du réseau d'antennes A_2 mesurés et simulés en espace libre à 60 GHz sont comparés en Figure III.22. Un très bon accord est observé entre simulation et mesure quel que soit le plan du modèle de rayonnement (Figure III.22a et b). Comme pour le réseau d'antennes A_1 , une remonté du niveau de polarisation croisée induite par la présence du connecteur dans le plan H est identifiable (Figure III.22b). Concernant le rayonnement arrière du réseau d'antennes A_2 (Figure III.22c et d), un bon accord est visible en termes de forme du lobe de rayonnement arrière quel que soit le plan. En revanche, entre -20° et 20° , le niveau de rayonnement simulé est plus élevé qu'en mesure, jusqu'à -4 dB.

■ Impact du fantôme équivalent à 60 GHz

En présence du fantôme équivalent le modèle de rayonnement du prototype du réseau A_2 est fortement impacté. Cela se traduit par une réduction du niveau des lobes de rayonnement arrière (Figure III.22c et d) et par des déformations observables sur le lobe principal du prototype mesuré

(Figure III.22a et b) liées aux réflexions en surface du fantôme. Concernant le rayonnement arrière (Figure III.22c et d), en espace libre le niveau maximal est de l'ordre de -9 dB autour de l'angle 0°, ce niveau n'est plus que de -30 dB en présence du fantôme soit une différence de l'ordre 21 dB.

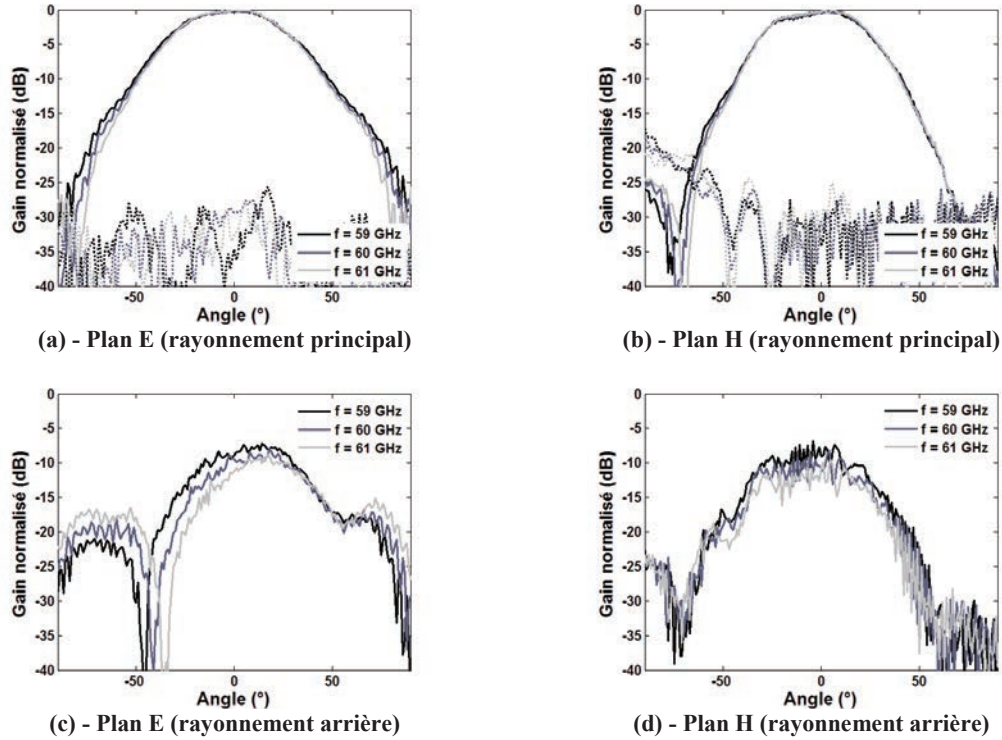


Figure III.21 - Diagrammes de rayonnement du réseau A_2 mesurés en espace libre entre 59 GHz et 61 GHz : (—) co-polarisation et (---) polarisation croisée.

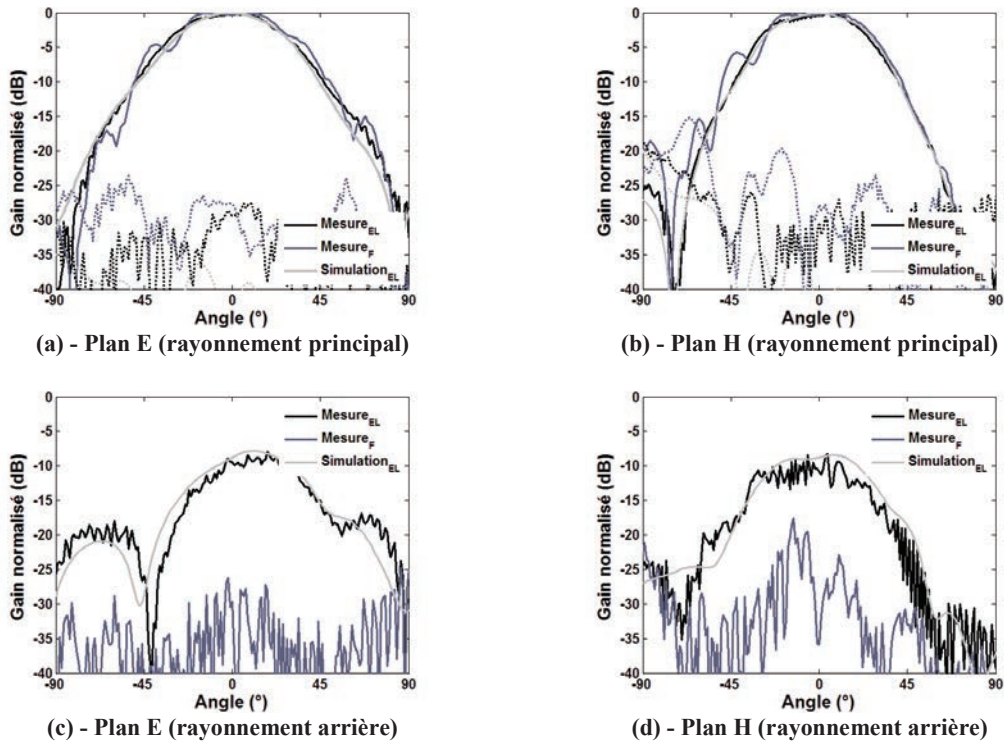


Figure III.22 - Diagrammes de rayonnement du réseau A_2 mesurés et simulés à 60 GHz en espace libre et en présence du fantôme équivalent : (—) co-polarisation et (---) polarisation croisée.

4.3.3. Prototype du réseau d'antennes A_3 et A_{3b}

■ Stabilité du modèle de rayonnement sur la bande 59-61 GHz

La Figure III.23, présente les diagrammes de rayonnement avant et arrière d'un prototype de réseau d'antennes A_3 sur la bande de fréquence 59-61 GHz. Quelle que soit la fréquence, un très bon accord en termes de forme est observé dans les plans E et H des diagrammes de rayonnement avant (Figure III.23a et b) et en termes de niveau de rayonnement entre les lobes de rayonnement arrière (Figure III.23c et d).

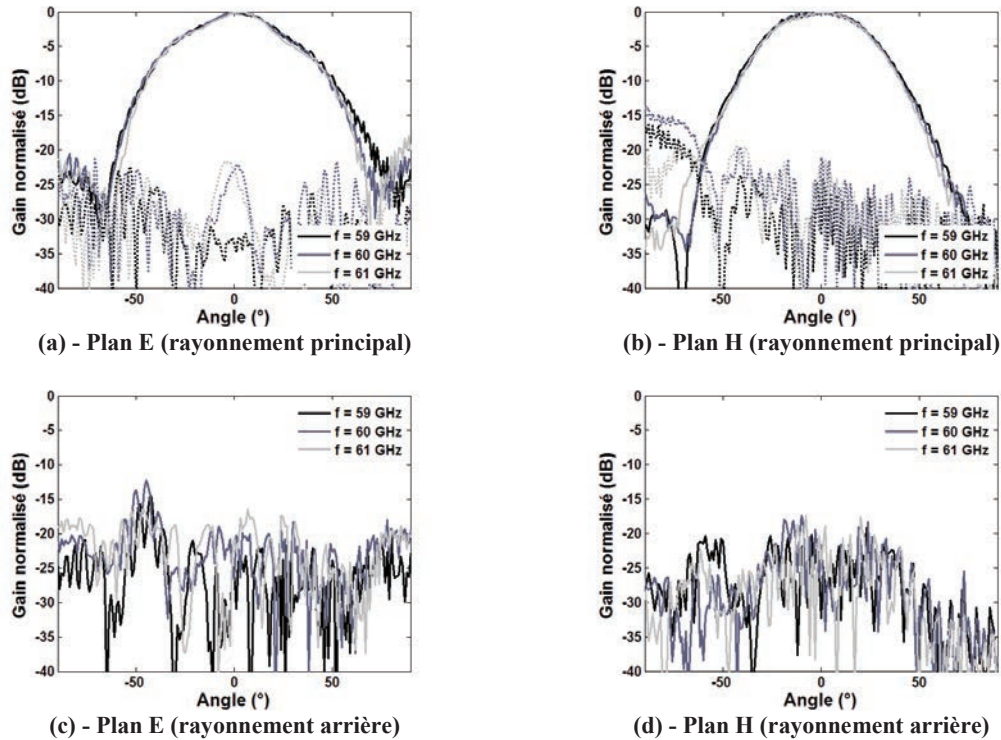


Figure III.23 - Diagrammes de rayonnement du réseau A_3 mesurés en espace libre entre 59 GHz et 61 GHz : (—) co-polarisation et (---) polarisation croisée.

■ Comparaison entre simulation et mesure à 60 GHz

La superposition des diagrammes de rayonnement simulés et mesurés en espace libre à 60 GHz est présentée en Figure III.24. En ce qui concerne les diagrammes de rayonnement avant, un très bon accord est observé dans les plans E et H (Figure III.24a et b). En raison des niveaux de lobes rayonnement arrière très faibles (inférieurs à -20 dB autour de 0°) dans le cas du réseau A_3 , les diagrammes numériques et expérimentaux sont difficiles à comparer car ils sont très « bruyés » (Figure III.24c et d). Cependant, certaines tendances sont semblables entre simulation et mesure, comme par exemple la remonté du niveau de rayonnement arrière au niveau de l'angle -45° dans le plan E.

■ Impact du fantôme équivalent à 60 GHz

La comparaison des diagrammes de rayonnement mesurés à 60 GHz pour le prototype du réseau d'antennes A_3 en espace libre et en présence du fantôme (Figure III.24) révèle un faible impact de la présence du fantôme sur la forme ou bien le niveau du rayonnement avant et arrière. En effet, quel que soit le plan du réseau, les lobes principaux mesurés en espace libre ou bien en

présence du fantôme présentent un bon accord (Figure III.24a et b). Les niveaux de polarisation croisée dans le plan E sont inférieurs à -20 dB (Figure III.24a), et comme pour les réseaux précédents, une remontée de la polarisation croisée induite par le connecteur de mesure est remarquable entre -90° et 0° dans le plan H (Figure III.24b). Concernant les niveaux de rayonnement arrière, la présence du fantôme induit une réduction de l'ordre de 5 à 7 dB. Cet écart est difficile à estimer en raison du bruitage des lobes de rayonnement arrière.

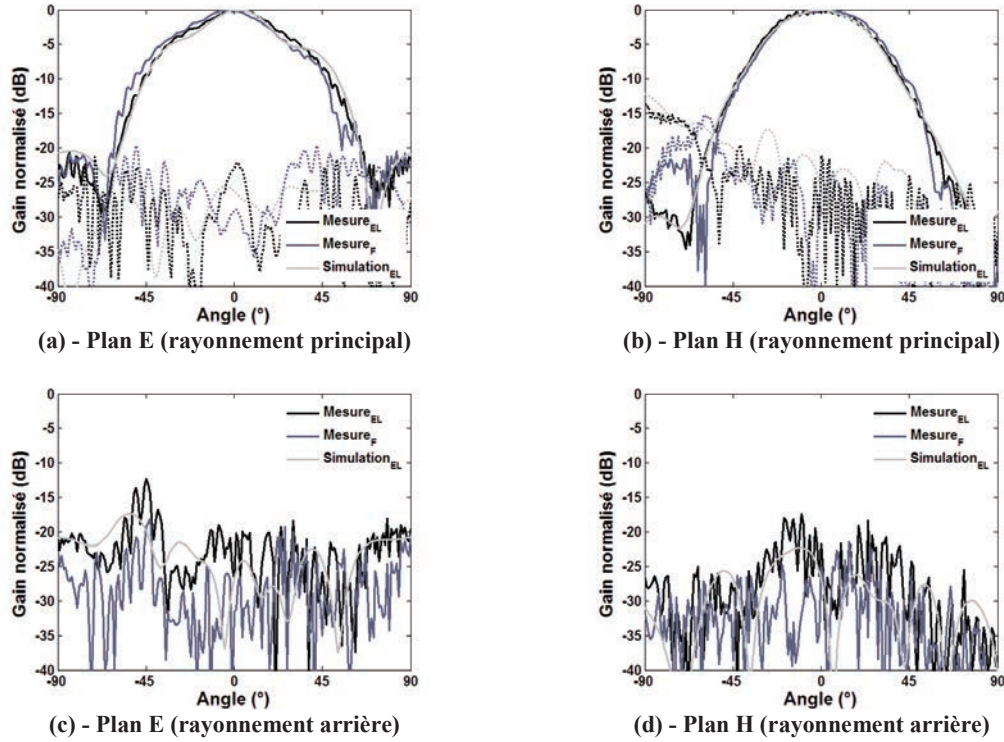


Figure III.24 - Diagrammes de rayonnement du réseau A_3 mesurés et simulés à 60 GHz en espace libre et en présence du fantôme équivalent : (—) co-polarisation et (---) polarisation croisée.

4.3.4. Prototype du réseau d'antennes A_4 et A_{4b}

■ Stabilité du modèle de rayonnement sur la bande 59-61 GHz

Les diagrammes de rayonnement en Figure III.25 comparent les formes et les niveaux de rayonnement d'un prototype du réseau A_4 sur la bande de fréquence 59-61 GHz en espace libre. La superposition des modèles de rayonnement dans les plans E et H à 59 GHz, 60 GHz et 61 GHz révèle un accord correct en termes de forme ou bien de niveau du rayonnement. En effet, le niveau du lobe secondaire dans le plan E (Figure III.25a) est légèrement affecté par les variations de fréquences (au maximum de -2,1 dB entre 59 GHz et 61 GHz), de même que les niveaux des lobes de rayonnement arrière (Figure III.25c et d) où les variations sont de l'ordre de -4,7 dB en 0° entre 59 GHz et 61 GHz.

■ Comparaison entre simulation et mesure à 60 GHz

Les comparaisons des diagrammes de rayonnement simulés et mesurés en espace libre à 60 GHz pour le réseau d'antennes A_4 sont présentées en Figure III.26. Précisons que contrairement aux réseaux d'antennes précédents, le connecteur se situe dans le plan E du modèle de rayonnement (Figure III.26a et c). La superposition des diagrammes de rayonnement avant dans les plans E et H (Figure III.26a et b), montre qu'en mesure l'ouverture à mi-puissance du lobe

principal augmente par rapport aux résultats numériques. Dans le plan E, l'ouverture à -3 dB du lobe principal mesurée est de 45° contre 38° en simulation et dans le plan H l'ouverture mesurée est de 50° et celle simulée de 40° . De plus, le niveau du lobe secondaire de rayonnement dans le plan E (Figure III.26a) est aussi plus élevé en mesure qu'en simulation ; expérimentalement le niveau atteint -5 dB alors que numériquement il ne dépasse pas -8 dB. Concernant les formes et les niveaux de rayonnement arrière (Figure III.26c et d), des tendances semblables en termes de formes sont observées, en revanche les niveaux des lobes arrière de rayonnement sont plus élevés expérimentalement que numériquement. Suivant 0° , le niveau mesuré est de l'ordre de -15 dB, alors qu'en simulation il est seulement de -23 dB. Précisons que dans le plan E (Figure III.26c), le rayonnement arrière peut atteindre jusqu'à -9 dB autour de -45° , cette remontée s'explique par la présence du connecteur de mesure dans ce plan.

■ Impact du fantôme équivalent à 60 GHz

L'analyse de la Figure III.26 indique qu'en présence du fantôme équivalent, la forme du diagramme de rayonnement avant est particulièrement affectée dans le plan E (Figure III.26a). Ce changement de forme peut s'expliquer par les réflexions du lobe secondaire de rayonnement en surface du fantôme équivalent, lesquelles entraînent aussi des déformations du lobe secondaire entre -90° et -45° . La forme du lobe principal dans le plan H (Figure III.26b) est relativement stable lors de la mise en présence du prototype avec le fantôme. Comme attendu, la forme et les niveaux du rayonnement arrière sont fortement impactés par la présence du fantôme (Figure III.26c et d). Dans ce cas, le rayonnement arrière à 0° est de 19 dB inférieur au niveau en espace libre soit environ -34 dB.

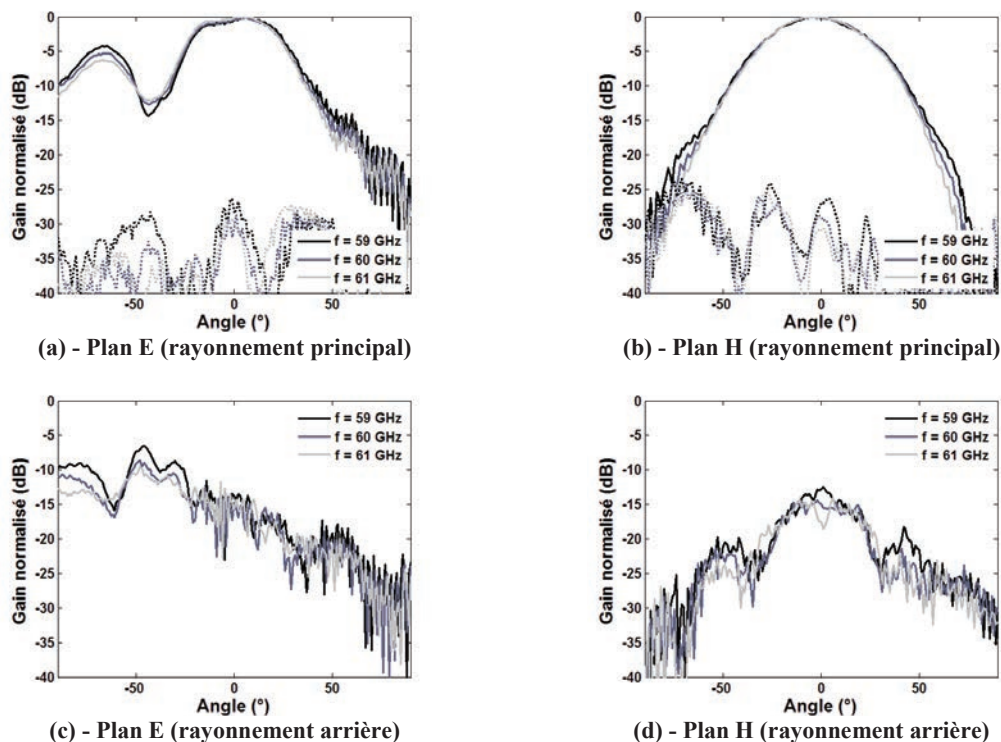


Figure III.25 - Diagrammes de rayonnement du réseau A_4 mesurés en espace libre entre 59 GHz et 61 GHz : (—) co-polarisation et (---) polarisation croisée.

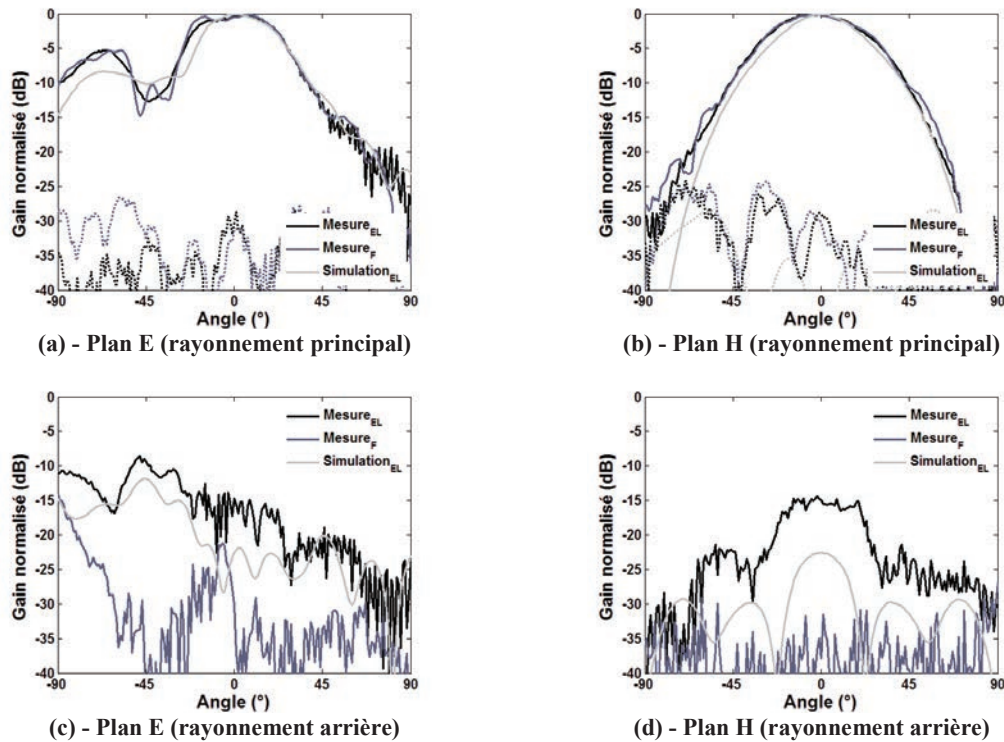


Figure III.26 - Diagrammes de rayonnement du réseau A_4 mesurés et simulés à 60 GHz en espace libre et en présence du fantôme équivalent : (—) co-polarisation et (---) polarisation croisée.

4.3.5. Bilan

■ Stabilité du modèle de rayonnement sur la bande 59-61 GHz

De manière générale, la stabilité des modèles de rayonnement des réseaux d'antennes *off-body* mesurés est acceptable pour tous. Cependant des différences sont relevées en fonction des certaines caractéristiques des diagrammes de rayonnement. En effet, dans le cas des réseaux A_1 et A_4 les formes des lobes secondaires du modèle de rayonnement sont sensibles aux variations de fréquences. Dans le cas des réseaux A_2 et A_4 , les niveaux du lobe de rayonnement arrière ont tendance à diminuer lorsque la fréquence augmente.

Tableau III.6 - Résumé de la stabilité des différents prototypes sur la bande 59-61 GHz.

Rayonnement	A_1		A_2		A_3		A_4	
	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H
Avant	★★	★★	★★★	★★★	★★★	★★★	★★	★★★
Arrière	★★★	★★★	★★	★★	★★★	★★★	★★	★★★

Stabilité du rayonnement des prototypes sur la bande 59-61 GHz : ★★ Moyenne ; ★★★ Correcte

■ Comparaison entre simulation et mesure à 60 GHz

La superposition des diagrammes mesurés pour les réseaux A_1 , A_2 et A_3 aux résultats obtenus par simulation révèle un accord très acceptable en terme de forme ou bien de niveau. L'accord est particulièrement marqué entre les lobes de rayonnement avant. Notons en revanche dans le cas des rayonnements arrière de légères variations d'amplitude inférieures à 5 dB. Dans le cas du réseau A_3 les niveaux de rayonnement arrières mesurés sont très faibles rendant difficile l'interprétation de la comparaison avec les résultats de simulation. En ce qui concerne le réseau A_4 , des différences de formes et de niveau sont notables dans le plan E du diagramme de

rayonnement avant et arrière. Le niveau du diagramme de rayonnement arrière dans le plan H est plus élevé en mesure qu'en simulation (-15 dB en mesure contre -23 dB en simulation suivant 0°).

Tableau III.7 - Résumé de la comparaison entre les modèles de rayonnement numériques et expérimentaux à 60 GHz.

Rayonnement	A_1		A_2		A_3		A_4	
	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H
Avant	★★★	★★	★★★	★★★★	★★★	★★★	★★	★★★★
Arrière	★★★	★★	★★	★★	★★	★★	★	★

Accord entre les diagrammes de rayonnement mesurés et simulé : ★ Faible ; ★★ Moyen ; ★★★ Correct

▪ Impact du fantôme équivalent à 60 GHz

La comparaison des diagrammes de rayonnement mesurés en espace libre et en présence du fantôme pour les différents prototypes a montré que la présence du fantôme affecte principalement les lobes de rayonnement arrière. Dans le cas du réseau d'antennes A_1 le rayonnement arrière suivant 0° est réduit de 12 dB en présence du fantôme, dans le cas des réseaux A_2 et A_4 la réduction est plus importante, elle est respectivement de -21 dB et de -19 dB à 0°.

Tableau III.8 - Résumé de l'impact de la présence du fantôme à 60 GHz.

Rayonnement	A_1		A_2		A_3		A_4	
	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H	Plan E	Plan H
Avant	★★★	★★★	★★	★★	★★★	★★★	★★	★★★★
Arrière	★★	★★	★	★	★★★	★★★	★	★

Impact de la présence du fantôme sur le rayonnement des prototypes : ★ Important ; ★★ Modéré ; ★★★ Négligeable

4.4. Gain et efficacité du rayonnement des prototypes

Dans cette section les dynamiques de gain et d'efficacité de rayonnement des prototypes des réseaux d'antennes sont analysées sur la bande 59-61 GHz en espace libre et en présence du fantôme équivalent. Une comparaison est également réalisée entre les valeurs de gain mesurées et celles calculées numériquement à 60 GHz pour chaque réseau d'antennes en espace libre. Précisons que les valeurs de gain mesuré donnés dans les paragraphes qui suivent tiennent compte des pertes des connectiques, les valeurs mesurées ont été compensées en +1,1 dB.

4.4.1. Prototype du réseau d'antennes A_1

Le comportement du gain et de l'efficacité sur la bande 59-61 GHz en espace libre et en présence du fantôme est donné en Figure III.27. En espace libre, l'amplitude maximale des variations du gain est 1,7 dBi et celle de l'efficacité est de 0,13. Les écarts-types sur la bande fréquence sont de l'ordre de $\pm 0,62$ dBi pour le gain et de $\pm 0,04$ pour l'efficacité.

A 60 GHz, le gain mesuré en espace libre pour le prototype d'antennes A_1 est de 9,4 dBi et l'efficacité de rayonnement est égale à 0,45 (Figure III.27). Le gain simulé est lui de 11,8 dB soit un écart entre simulation et mesure de l'ordre de 2,4 dB (25 %).

En présence du fantôme les valeurs de gain et d'efficacité du rayonnement expérimental sont quasiment équivalentes. En effet, en espace libre la valeur de gain mesurée à 60 GHz est de 9,4 dBi et celle de l'efficacité de 0,45, en présence du fantôme le gain est de 9,5 dBi et l'efficacité est

de 0,44. Les performances en rayonnement du prototype sont donc faiblement impactées par la présence du fantôme du mesure.

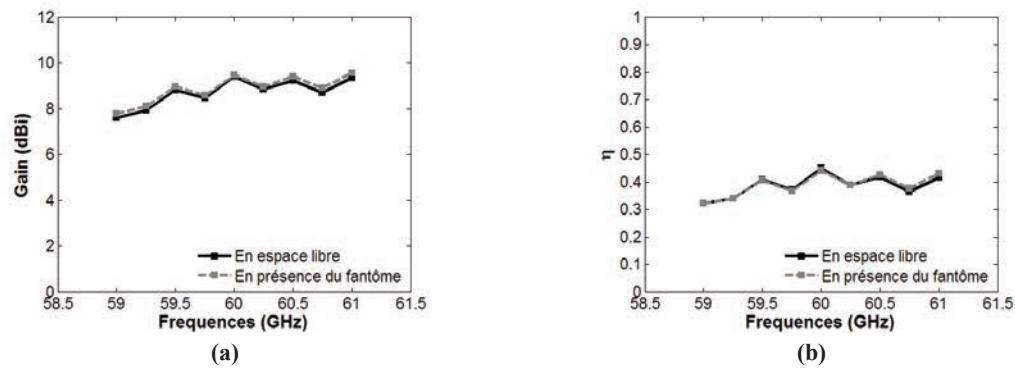


Figure III.27 - Evolution du (a) gain mesuré et de (b) l'efficacité du réseau d'antennes A_1 en espace libre et en présence du fantôme sur la bande 59-61 GHz.

4.4.2. Prototype du réseau d'antennes A_2

L'évolution du gain et de l'efficacité de rayonnement du réseau d'antennes A_2 en espace libre et en présence du fantôme sur la bande 59-61 GHz est présentée en Figure III.28. L'analyse de la Figure III.28a montre que le gain sur la bande de fréquence varie de 0,48 dBi avec un écart-type de $\pm 0,15$ dBi. Les variations de l'efficacité de rayonnement sont elles de l'ordre de 0,1 avec un écart-type de $\pm 0,03$ (Figure III.28a). Les performances en rayonnement du réseau A_2 sont donc peu sensibles aux variations de fréquences sur la bande 59-61 GHz.

La comparaison du gain expérimental du réseau d'antennes A_2 avec le gain simulé à 60 GHz, montre que comme pour le réseau d'antennes A_1 le gain simulé est plus élevé. En effet en mesure le gain est de l'ordre de 8,8 dBi et l'efficacité de rayonnement atteint 0,65 et en simulation le gain est égale 9,7 dB, soit une différence de l'ordre de 10 %.

En revanche, contrairement au réseau A_1 dont les valeurs de gain mesurées en espace libre et en présence de fantôme sont semblables, le gain du réseau d'antennes A_2 augmente en présence du fantôme du faite notamment des réflexions sur la surface du fantôme. En présence du fantôme la valeur du gain augmente de 0,7 dBi pour atteindre 9,5 dBi. L'efficacité de rayonnement en présence du fantôme est elle de l'ordre de celle en espace libre avec une valeur à 0,67.

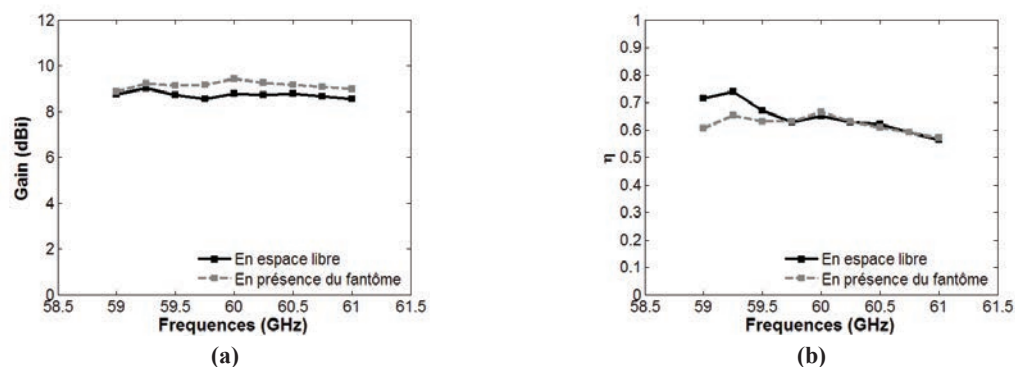


Figure III.28 - Evolution du (a) gain mesuré et de (b) l'efficacité du réseau d'antennes A_2 en espace libre et en présence du fantôme sur la bande 59-61 GHz.

4.4.3. Prototype du réseau d'antennes A_3 et A_{3b}

Les variations de mesure du gain du réseau d'antennes A_3 en espace libre sur la bande de fréquence 59-61 GHz sont présentées en Figure III.29. Les variations relevées entre les valeurs minimales et maximales de gain sont de l'ordre de 1,1 dBi sur la bande avec un écart-type $\pm 0,40$ dBi de et celles de l'efficacité de 0,2 avec un écart-type de $\pm 0,06$.

La comparaison des performances en rayonnement mesurées à 60 GHz en espace libre à celles obtenues par simulation, montre que le gain expérimental est plus faible que celui obtenu numériquement. En effet le gain simulé est de 10,3 dB et celui du prototype mesuré est de 9,6 dBi (-7 %).

La présence du fantôme impact légèrement les valeurs de gain et l'efficacité de rayonnement expérimentale à 60 GHz du réseau d'antennes A_3 . En effet, en présence du fantôme le gain augmente de 0,4 dBi pour atteindre la valeur de 10 dBi. L'efficacité est elle moins impactée puisqu'en espace libre elle est de 0,65 et en présence du fantôme de 0,63.

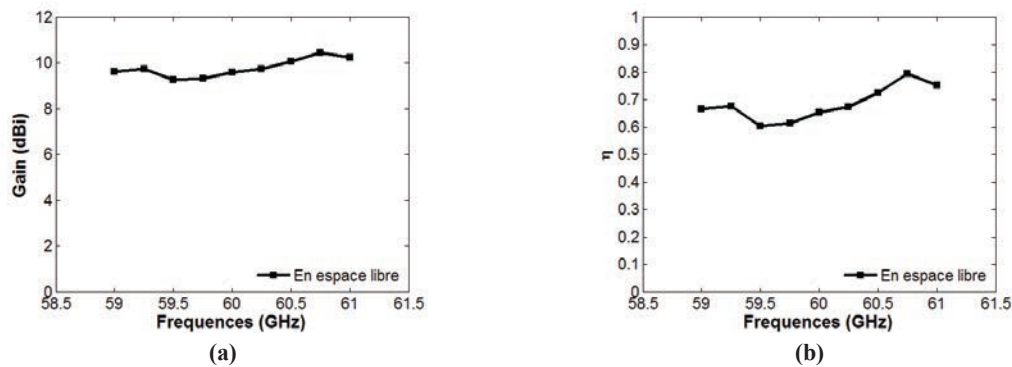


Figure III.29 - Evolution du (a) gain mesuré et de (b) l'efficacité du réseau d'antennes A_3 en espace libre sur la bande 59-61 GHz.

4.4.4. Prototype du réseau d'antennes A_4 et A_{4b}

Dans le cas du réseau d'antennes A_4 , les performances en rayonnement sur la bande de fréquence de 2 GHz centrée sur 60 GHz, présentées en Figure III.30, montrent que la variation maximale de la mesure de gain en espace libre est de l'ordre de 1,92 dBi et que l'efficacité de rayonnement du réseau A_4 varie au maximum de 0,16. L'écart-type pour le gain est de $\pm 0,7$ dBi sur la bande de fréquence et celui de l'efficacité de $\pm 0,06$.

La comparaison de la valeur mesurée du gain à 60 GHz à la valeur obtenue numériquement, révèle que comme pour les autres réseaux d'antennes, le gain mesuré est plus faible qu'en simulation. En effet le gain simulé est de 11,1 dB, contre seulement un gain en mesure de l'ordre de 9,8 dBi soit une réduction de 13 %.

Les performances en rayonnement du prototype de réseau d'antennes A_4 à 60 GHz sont légèrement réduites en présence du fantôme équivalent. En effet, en présence du fantôme le gain mesuré est de 9,6 dBi contre 9,8 dBi en espace libre soit 2 % de différence et l'efficacité du réseau A_4 passe de 0,59 en espace libre de 0,52 en présence du fantôme équivalent.

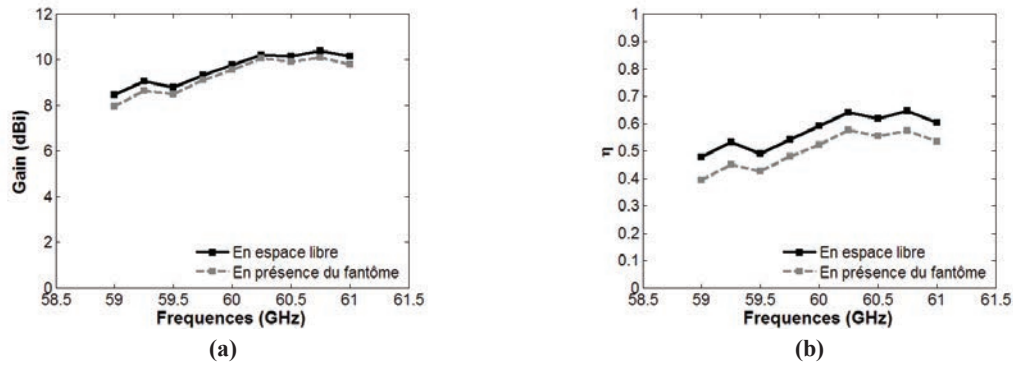


Figure III.30 - Evolution du (a) gain mesuré et de (b) l'efficacité du réseau d'antennes A_4 en espace libre et en présence du fantôme sur la bande 59-61 GHz.

4.4.5. Bilan

■ Stabilité du gain et de l'efficacité sur la bande 59-61 GHz

L'efficacité de rayonnement des prototypes de réseaux d'antennes *off-body*, reste globalement stable quel que soit le réseau (Tableau III.9). Cependant le réseau A_4 est le moins stable avec une variation maximale sur la bande 59-61 GHz de 0,16. C'est également ce réseau d'antennes qui présente les variations de gain les plus importantes avec un écart-type de $\pm 0,70$ dBi.

Tableau III.9 - Variations maximales (Δ) et écart-types (σ) entre les performances en rayonnement des réseaux d'antennes *off-body* mesurés en espace libre sur la bande 59-61 GHz.

Performances	A_1		A_2		A_3		A_4	
	Δ	σ	Δ	σ	Δ	σ	Δ	σ
Gain (dBi)	1,70	$\pm 0,62$	0,48	$\pm 0,15$	1,1	$\pm 0,40$	1,92	$\pm 0,70$
η	0,13	$\pm 0,04$	0,10	$\pm 0,03$	0,2	$\pm 0,06$	0,16	$\pm 0,06$

■ Comparaison entre les valeurs numériques et expérimentales

La comparaison des valeurs de gain obtenues expérimentalement ou bien numériquement en espace libre a montré que, quel que soit le réseau d'antennes, la valeur obtenue par mesure est plus faible que celle simulée (Tableau III.10). Cette tendance peut pour certains réseaux d'antennes telles que A_1 , A_2 ou bien A_4 s'expliquer en partie par la désadaptation du coefficient de réflexion. En effet, pour ces trois réseaux le niveau du module S_{11} mesuré est supérieur d'au moins 5 dB à celui simulé (Figure III.18).

Tableau III.10 - Valeurs du gain numérique et expérimental à 60 GHz des différents réseaux d'antennes *off-body*.

Gain	A_1	A_2	A_3	A_4
Numérique (dB)	11,8	9,7	10,3	11,1
Expérimental (dBi)	9,4	8,8	9,6	9,8

▪ **Impact du fantôme sur les performances en rayonnement mesurées à 60 GHz**

La présence du fantôme a un impact limité sur l'efficacité η des réseaux d'antennes *off-body* comparés. C'est le réseau A_4 qui est le plus affecté avec une réduction de son efficacité en présence du fantôme de 0,07.

En ce qui concerne le gain, la présence du fantôme a tendance à le faire croître légèrement de 0,1 dBi pour le réseau A_1 à 0,7 dBi pour le réseau A_2 . Dans le cas du réseau A_4 , le gain a en revanche tendance à diminuer en présence du fantôme.

Tableau III.11 – Gain et efficacité de rayonnement expérimentale des prototypes de réseaux d'antennes *off-body* à 60 GHz.

Prototypes	Gain (dBi)		η (%)	
	Espace libre	Fantôme	Espace libre	Fantôme
A_1	9,4	9,5	45	44
A_2	8,8	9,5	65	67
A_3	9,6	10	65	63
A_4	9,8	9,6	59	52

5. Conclusion

Dans ce chapitre, les contraintes concernant la réalisation (ajout de couches de prépreg, accès à l'arborescence d'alimentation) et de mesure (accès du connecteur de mesure) des différents réseaux d'antennes *off-body* comparés dans le Chapitre II ont été prises en compte afin d'optimiser l'organisation des structures des réseaux d'antennes à fabriquer. Les dimensions des réseaux d'antennes ont été ajustées numériquement suite à la prise en compte des contraintes de fabrication. Les dimensions et les performances de ces réseaux d'antennes réalisables ont été données en annexes.

Une étude paramétrique numérique a également été effectuée afin d'estimer les déviations induites par les tolérances de gravure et d'alignement des niveaux de cuivre dans les différentes structures. Cette étude a mis en évidence une sensibilité plus importante des réseaux d'antennes alimentées par fentes couplées A_2 , A_3 , As_2 et As_3 pour lesquelles les dimensions et l'alignement des lignes de l'arborescence et des fentes peuvent se révéler très critiques sur les performances antennaires.

Les différents prototypes réalisés ont été présentés, et les spécificités de chaque séquençage de fabrication ont été détaillées afin de mettre en avant les difficultés de réalisation liées à chaque structure antennaires. Une estimation des incertitudes de gravure sur les couches accessibles des différents réseaux d'antennes a aussi été réalisée. Les désalignements des réseaux réalisés sur la structure 2C ont également pu être évalués. Cette étude de précision a montré que globalement les tolérances annoncées avaient été respectées.

Les performances expérimentales des réseaux d'antennes réalisés A_1 , A_2 , A_3 , A_{3b} , A_4 et A_4 ont ensuite été évaluées en espace libre et en présence du fantôme équivalent de la peau humaine en termes d'adaptation du module du coefficient de réflexion à -10 dB, de diagramme de rayonnement et de performances en rayonnement à 60 GHz. Les résultats obtenus expérimentalement ont été comparés à ceux obtenus après simulation avec des modèles numériques des réseaux d'antennes optimisés sous CST MWS. De plus, ces modèles tiennent compte de l'impact du connecteur, puisqu'un modèle réaliste du connecteur a été utilisé en simulation.

L'analyse des mesures du module du coefficient de réflexion des différents réseaux d'antennes réalisée sur la bande 55-65 GHz a montré que les prototypes des réseaux de l'étude expérimentale sont adaptés à -10 dB à 60 GHz. Nous considérons même qu'ils sont tous adaptés ou quasi-adaptés sur la bande 59-61 GHz. En raison d'un écartement entre les réseaux d'antennes et la surface du fantôme équivalent important, les niveaux du module S_{11} des prototypes sont très stables sur la bande 55-65 GHz, à l'exception du réseau d'antennes A_2 qui ne possède pas de plan de masse sur la face de sa structure coté fantôme.

La stabilité des diagrammes de rayonnement est étudiée sur la bande 59-61 GHz. Globalement, la stabilité du rayonnement des réseaux d'antennes est correcte. En effet, on ne distingue pas de déformations majeures des diagrammes dues aux variations de fréquence. Cependant, ce sont les lobes secondaires et le lobes arrières de rayonnement à niveaux élevés qui sont les plus sensibles aux variations de fréquence. L'efficacité de rayonnement des réseaux reste stable sur la bande ; en revanche les valeurs de gain ont tendance à augmenter sur la bande de fréquence, c'est pour le réseau A_4 que sont constatées les déviations les plus importantes.

La comparaison des diagrammes de rayonnement mesurés des différents prototypes des réseaux d'antennes en espace libre avec ceux simulés à 60 GHz a révélé une superposition

satisfaisant des formes et des niveaux de rayonnement des réseaux A_1 , A_2 , et A_3 . Les diagrammes mesurés avec le prototype du réseau A_4 montrent des différences importantes avec le rayonnement attendu numériquement. La différence entre simulation et mesure est aussi présente en termes de valeur de gain.

L'analyse de l'impact de la présence du fantôme a montré, comme attendu, que les réseaux d'antennes avec des niveaux de lobe de rayonnement arrière élevés sont beaucoup plus affectés lors de la mise en présence du fantôme équivalent du corps humain. En effet, les réseaux d'antennes A_2 et A_4 voient leurs niveaux de rayonnement arrière diminués d'environ 20 dB dans la direction 0° alors que la réduction induite sur le rayonnement arrière du réseau A_3 est seulement de l'ordre de 5 dB entre -45° et 45° .

Tableau III.12 - Récapitulatifs des points importants développés concernant la réalisation et les mesures des prototypes des réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz.

		A_1	A_2	A_3	A_4
Réalisation	<i>Difficultés</i>	Faibles	Modérées	Elevées	Modérées
	<i>Impact des tolérances de fabrications</i>	Modéré	Elevé	Elevé	Faible
Adaptation	<i>Bande passante (GHz)</i>	4,0	4,7	4,0	2,4
	<i>Impact du fantôme</i>	Faible	Modéré	Faible	Faible
Performances en rayonnement	<i>Stabilité sur la bande 59-61 GHz</i>	Modérée	Modérée	Elevée	Modérée
	<i>Accord entre simulation et mesure</i>	Elevé	Elevé	Elevé	Modéré
	<i>Impact du fantôme</i>	Modéré	Elevé	Faible	Elevé

6. Références

- [1] FastRise, Taconic, “<http://www.taconic-add.com/en--products--fastrise--1.php>”
- [2] RT/duroid 5870-5880, “<http://www.rogerscorp.com/acs/products/32/RT-duroid-5880-Laminates.aspx>”
- [3] V Female Sparkplug Launcher Connector, V102F-R, Anritsu, “<http://www.anritsu.com/en-US/components-accessories/products/v102f-r>”
- [4] N. Chahat, M. Zhadobov, and R. Sauleau, “Broadband tissue-equivalent phantom for BAN applications at millimeter waves,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 7, pp. 2259–2266, Jul. 2012.

Chapitre IV. Modélisation analytique du comportement thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz

Sommaire

1.	Introduction	123
1.1.	Les modèles thermiques du corps humain.....	123
1.2.	Problématique.....	128
2.	Notions de base en thermodynamique.....	130
2.1.	Caractéristiques thermiques d'un matériau solide	130
2.2.	Modes de transfert de chaleur.....	132
2.3.	Conditions aux limites.....	134
3.	Caractéristiques thermo-physiques du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz	137
3.1.	Capacité thermique du fantôme.....	137
3.2.	Conductivité thermique du fantôme	139
4.	Expression analytique des transferts de chaleur dans un fantôme exposé à une onde électromagnétique	142
4.1.	Modèle d'exposition considéré	142
4.2.	Equation de transfert de chaleur	142
4.3.	Conditions spécifiques au modèle	143
5.	Résolution de l'équation de transfert de chaleur	145
5.1.	Solution en régime établi.....	145
5.2.	Solution en régime stationnaire sans terme source.....	146
6.	Etude du comportement de la solution analytique $T(z,t)$	148
6.1.	Convergence et précision de $T(z,t)$	148
6.2.	Analyse paramétrique de $T(z,t)$	149
7.	Conclusion.....	153
8.	Références	154

1. Introduction

1.1. Les modèles thermiques du corps humain

En bande millimétrique, l'effet principal induit par l'absorption du rayonnement électromagnétique dans les tissus exposés (ou proches de ceux exposés) est l'élévation de leur température. Cette dernière est plus importante en bande millimétrique qu'à des fréquences plus basses pour une même densité de puissance incidente. Ce phénomène s'explique par la faible profondeur de pénétration du rayonnement en millimétrique qui concentre l'absorption dans les couches superficielles du corps humain telle que la peau et par un coefficient de transmission plus important qu'aux fréquences plus basses [1].

Le comportement thermique du corps humain a été modélisé analytiquement par Pennes [2] à travers l'équation dite équation de bio-chaleur (ou bien équation de Pennes)

$$\rho c_p \frac{\partial T_t}{\partial t} = k \nabla^2 T_t + Q_m + Q_s, \quad (1)$$

où ρ , c_p et k sont respectivement la masse volumique (kg/m^3), la capacité thermique ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$) et la conductivité thermique du tissu ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$). T_t est la température absolue locale du tissu ($^\circ\text{C}$), Q_m est le taux de chaleur métabolique produite dans le volume de tissu donné (W/m^3), et Q_s est le coefficient de transfert de chaleur dans un tissu (W/m^3). Ce dernier paramètre théorique représente l'apport principal amené par les travaux menés par Pennes, il suggère que le coefficient de transfert de chaleur entre le sang artériel et les tissus biologiques est proportionnel au produit du taux de perfusion sanguin et de la différence de température entre le sang et les tissus [3] :

$$Q_s = f_s \rho_s c_s (1 - i)(T_s - T_t), \quad (2)$$

avec f_s le taux de perfusion sanguine, ρ_s la masse volumique du sang, c_s la capacité thermique du sang, i un facteur relatif à l'équilibre thermique entre le sang et les tissus (égale à 0 en cas d'équilibre), et T_s la température du sang artériel.

Ce modèle analytique a été réutilisé dans de nombreux travaux ensuite pour développer des modèles de transfert de chaleur spécifiques à certaines parties du corps humain [3]. Il est aussi la base de plusieurs études visant à estimer et modéliser la réponse thermique de tissus exposés à une source de rayonnement électromagnétique. Ces derniers modèles peuvent être répartis en deux catégories : les modèles homogènes ou bien multicouches.

1.1.1. Modèle 1-D homogène

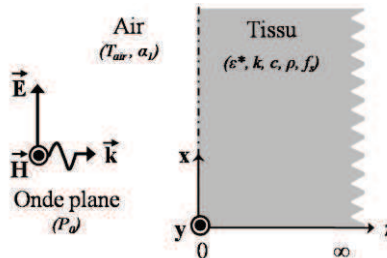


Figure IV.1 - Illustration du modèle de tissu homogène d'épaisseur semi-infinie à une onde plane [4].

Dans [4], l'équation 1D de transfert de chaleur d'un modèle thermique de tissu d'épaisseur semi-infinie exposé à une source électromagnétique est établie pour estimer l'échauffement induit

au cours d'exposition à une onde plane 1 et 10 GHz. Les dissipations de chaleur par convection avec le flux sanguin sont prises en compte dans l'équation suivante

$$\rho c_p \frac{\partial T_t}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T_t}{\partial z^2} - V_s(T_t - T_s) + Q(z, t), \quad (3)$$

où le terme $V_s (T_t - T_s)$ traduit la dissipation de chaleur par convection avec le flux sanguin, avec V_s égale au produit $f_s \rho_s c_s$. Le terme $Q(z, t)$ est relatif à l'échauffement généré par l'absorption de puissance électromagnétique durant l'exposition et s'exprime par l'équation suivante :

$$Q(z, t) = \frac{2 P_0 (1 - R)}{\delta} e^{-\frac{\delta}{2} z} u(t), \quad (4)$$

où P_0 est la densité de puissance incidente (W/m^2), R est le coefficient de réflexion en puissance, δ est la profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique dans le tissu exposé (m), et $u(t)$ est une fonction unité.

Pour la résolution, l'équation de transfert de chaleur simplifiée, relative uniquement à l'élévation de température ($T = T_t - T_s$) est considérée

$$\mu \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \lambda T + q(z, t) \quad (5)$$

où $\mu = \rho c_p / k$, $\lambda = V_s / k$ et $q(z, t) = Q(z, t) / k$.

L'équation (5) est résolue sous les conditions limites suivantes en $z = 0$

$$\frac{\partial T}{\partial z}(0, t) = \alpha(T + T_s - T_e), \quad t \geq 0, \quad (6)$$

et en $z \rightarrow +\infty$

$$T(+\infty, t) = 0, \quad t \geq 0, \quad (7)$$

où T_e est la température du milieu environnant et α est un coefficient égal au rapport h/k , où h est le coefficient de transfert de chaleur ($\text{W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$) à l'interface avec l'air en $z = 0$. Ce coefficient regroupe les pertes thermiques du tissu vers le milieu extérieur induites par le mécanisme de convection de l'air, de rayonnement thermique et d'évaporation de l'eau en surface du tissu exposé.

Dans le cas où $T_s \neq T_e$, un gradient de température apparaît au niveau de la surface du tissu ; ce gradient est exprimé analytiquement par la solution de l'équation de transfert en régime établi ($\partial T / \partial t = 0$) lorsque $q = 0$. Il définit la condition initiale du système

$$T(z, 0) = \frac{\alpha(T_e - T_s)}{\alpha + \sqrt{\lambda}} e^{-z\sqrt{\lambda}}. \quad (8)$$

Pour un modèle de tissu homogène, les solutions suivantes sont obtenues pour (5), en régime établi

$$T(z, \infty) = \frac{q_0}{\lambda - 1/L^2} \left[e^{-z/L} - \frac{1/L + \alpha}{\sqrt{\lambda} + \alpha} e^{-z\sqrt{\lambda}} \right] + \frac{\alpha(T_e - T_s)}{\alpha + \sqrt{\lambda}} e^{-z\sqrt{\lambda}}, \quad (9)$$

et en régime transitoire par l'utilisation d'une transformée de Fourier

$$\begin{aligned}
 T(z, t) = \frac{q_0}{\lambda - 1/L^2} & \left\{ e^{-\frac{z}{L}} + \frac{\frac{1}{L} + \alpha}{2(\sqrt{\lambda} - \alpha)} e^{z\sqrt{\lambda}} \operatorname{erfcf} \left(\frac{z}{2} \sqrt{\frac{\mu}{t}} + \sqrt{\frac{\lambda t}{\mu}} \right) \right. \\
 & - \frac{\frac{1}{L} + \alpha}{2(\sqrt{\lambda} + \alpha)} e^{-z\sqrt{\lambda}} \operatorname{erfcf} \left(\frac{z}{2} \sqrt{\frac{\mu}{t}} - \sqrt{\frac{\lambda t}{\mu}} \right) \\
 & - \frac{1}{2} e^{\left(\frac{t}{\mu} \left(\frac{1}{L^2} - \lambda \right) - \frac{z}{L} \right)} \operatorname{erfcf} \left(\frac{1}{L} \sqrt{\frac{t}{\mu}} - \frac{z}{2} \sqrt{\frac{\mu}{t}} \right) \\
 & - \frac{\frac{1}{L} + \alpha}{2 \left(\frac{1}{L} - \alpha \right)} e^{\left(\frac{t}{\mu} \left(\frac{1}{L^2} - \lambda \right) + \frac{z}{L} \right)} \operatorname{erfcf} \left(\frac{1}{L} \sqrt{\frac{t}{\mu}} + \frac{z}{2} \sqrt{\frac{\mu}{t}} \right) \\
 & \left. + \frac{\alpha(\lambda + 1/L^2)}{(\lambda - \alpha^2) \left(\frac{1}{L} - \alpha \right)} e^{\left(\alpha z + (\alpha^2 - \lambda) \frac{t}{\mu} \right)} \operatorname{erfcf} \left(\frac{z}{2} \sqrt{\frac{\mu}{t}} + \alpha \sqrt{\frac{t}{\mu}} \right) \right\} + \frac{\alpha(T_e - T_s)}{\alpha + \sqrt{\lambda}} e^{-z\sqrt{\lambda}}
 \end{aligned} \tag{10}$$

où $L = \delta/2$, $q_0 = P_0 (1-R)/\delta k$, et en supposant λ et α constants au cours de l'exposition. Précisons que $\operatorname{erfcf}(x)$ est la fonction d'erreur complémentaire, définie par $1 - \operatorname{erf}(x)$.

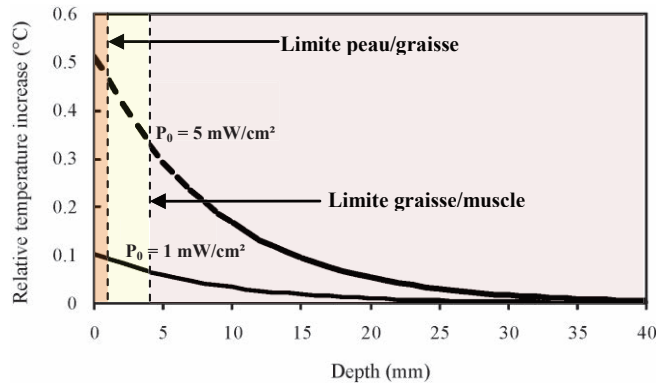


Figure IV.2 - Distributions d'élévation de température dans la peau pour une exposition de 1 mW/cm² et 5 mW/cm² [1].

Dans [1], les distributions d'élévations de température en régime établi ont été calculées pour un modèle homogène de la peau humaine exposé à une onde plane 60 GHz à partir de la solution analytique établie dans [4] pour deux densités de puissances incidentes, à savoir 1 mW/cm² et 5 mW/cm², (Figure IV.2). Les résultats obtenus montrent que, contrairement à l'absorption du rayonnement électromagnétique en bande millimétrique qui se concentre dans les couches de peau (épaisseur moyenne de l'ordre de 1 mm), l'échauffement thermique généré par l'absorption électromagnétique peut en revanche affecter des tissus plus en profondeur du corps humain tels que la graisse (épaisseur moyenne de l'ordre de 3 mm) ou bien le muscle.

1.1.2. Modèles 1-D multicouche

Plusieurs études en bande millimétrique ont comparé les élévations de température obtenues en régime établi pour des modèles 1D de tissus monocouche à celles obtenues avec des modèles multicouches. C'est le cas dans [5], où l'élévation de température induite par une exposition à 42 GHz est analysée en fonction du flux sanguin pour différents modèles thermiques du corps humain. Dans [6], une étude paramétrique est réalisée entre plusieurs modèles thermique mono- et multicouches sur la bande de fréquence millimétrique 30 - 300 GHz et plus particulièrement à 60 GHz.

Dans [5], l'équation de transfert de chaleur hybride, c'est-à-dire l'équation qui incorpore une conductivité thermique effective [7], est appliquée à plusieurs modèles de tissus dont le nombre de couches varie de 1 à 4 (Figure IV.3a). L'impact du flux sanguin sur l'élévation de température induit par l'exposition à une onde plane incidente ($P_0 = 20 \text{ mW/cm}^2$) en surface de la peau, est analysé pour les 4 modèles (Figure IV.3b), avec pour objectif de déterminer un rapport entre le flux sanguin dans le modèle de tissu homogène (*Model 1* Figure IV.3a) et celui dans la couche de derme des modèles multicouches permettant d'obtenir des élévations de température équivalentes à la surface de la peau. Mais cette étude met aussi en avant l'impact de la valeur du flux sanguin dans la couche derme sur le profil d'élévation de température (Figure IV.3c).

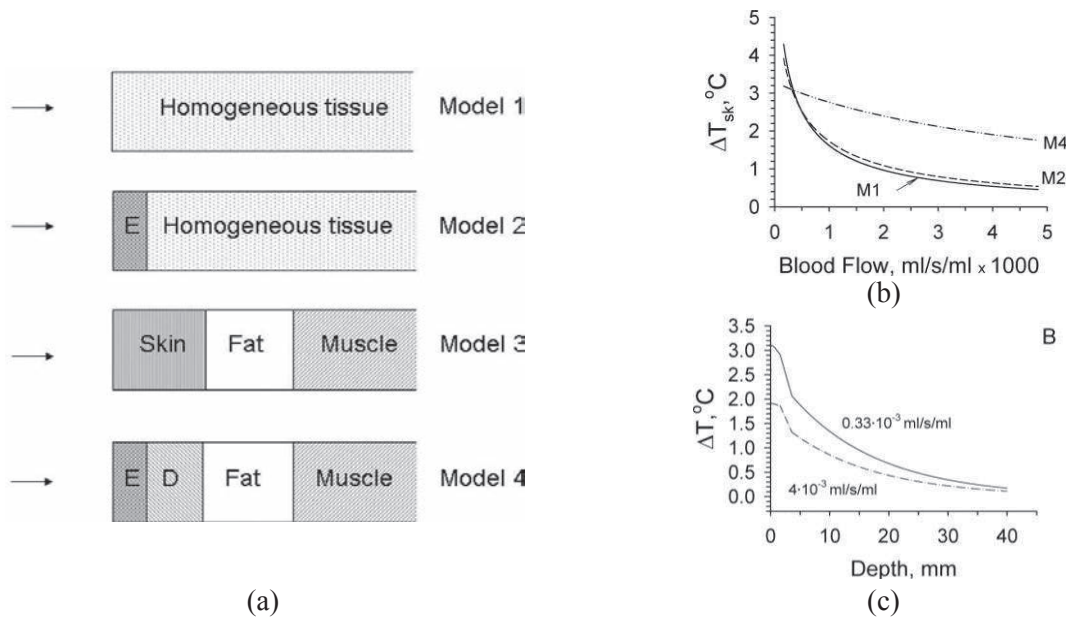


Figure IV.3 - Comparaison de l'élévation de température induite par une exposition à une onde plane à 42,25 GHz (20 mW/cm^2) entre (a) 4 modèles de tissus homogènes ou bien multicouches [5] ; (b) élévation de température en surface de la peau en fonction du flux sanguin ; (c) profils de température dans l'épaisseur du modèle 4 pour différentes valeurs de flux sanguin dans la couche derme.

Dans [6], un modèle de tissu homogène de la peau et un modèle multicouches composé de peau, graisse et muscle sont exposés en bande de fréquence millimétrique à une onde plane dont la densité de puissance incidente est de 50 W/m^2 . Une étude paramétrique analytique basée sur l'élévation de température en régime établi à la surface de ces deux modèles est réalisée à partir d'une solution de l'équation de bio-chaleur obtenue par une transformation de Laplace. Dans cette étude, les effets des variations des épaisseurs de tissus, de leurs propriétés thermiques, du flux sanguin, et du milieu extérieur ont été considérés. Pour le modèle multicouches (Figure IV.4a et Figure IV.4b), l'élévation de la température calculée en surface est entre 1,3 et 2,8 fois supérieure à celle obtenue pour le modèle homogène de la peau (Figure IV.4c et Figure IV.4d). Ce résultat met aussi en avant le caractère adiabatique de la couche de graisse. De plus, la comparaison montre aussi l'impact dominant du coefficient de transfert de chaleur h du corps vers l'air sur le comportement de l'élévation de la température.

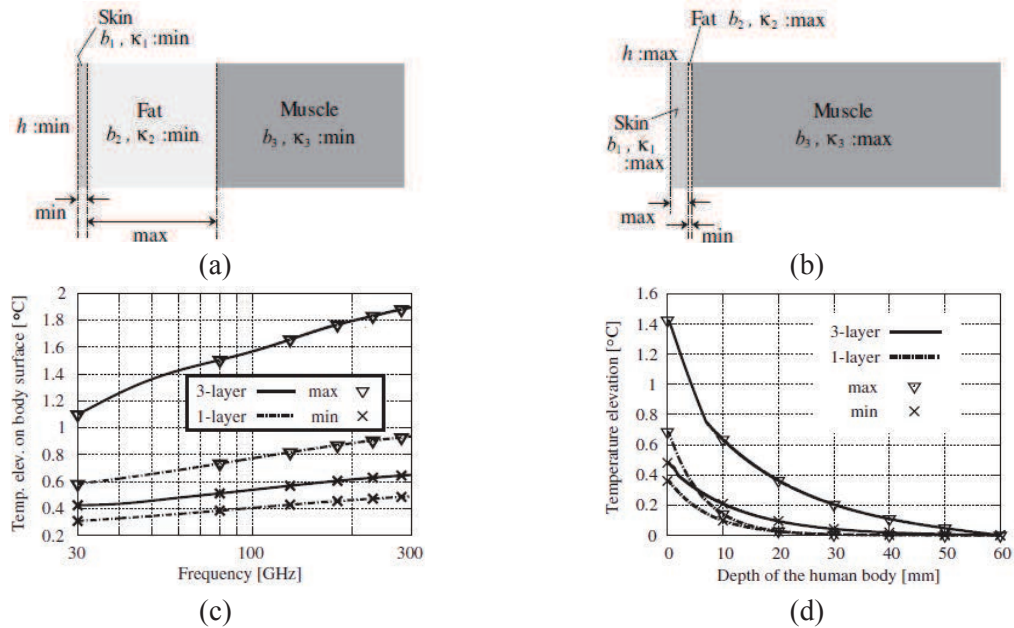


Figure IV.4 - Descriptions des modèles multicouches de tissus utilisés dans [6] induisant une élévation de température (a) maximale et (b) minimale. L'élévation de température obtenue avec ces deux modèles (c) en surface du corps est comparée au modèle homogène sur toute la bande millimétrique ou bien (d) dans l'épaisseur des modèles à 60 GHz.

Plus récemment, une étude paramétrique a été menée par Zilberti *et al.* afin d'identifier les effets de chaque paramètre physique sur l'élévation de température cette fois en régime transitoire dans des tissus humains exposés à une onde électromagnétique à 100 GHz et 1 THz [8]. Comme dans [6], Zilberti *et al.* considèrent pour leurs travaux un modèle trois couches de tissus (peau, graisse et muscle Figure IV.5a) exposé à une onde plane incidente (10 W/m²) pendant 1 sec. L'équation de bio-chaleur est résolue ici par la méthode des éléments finis. Les distributions d'élévation de température sont présentées dans l'épaisseur du modèle à plusieurs instants pendant ou post-exposition (Figure IV.5b et Figure IV.5c). Les effets des variations des paramètres thermo-physiques sur les tissus sont ensuite analysés et comparés aux résultats moyens, révélant des variations de la température maximale de - 30 % à + 10 % à 100 GHz et de - 33% à + 18 % à 1 THz. Des élévations de température maximales dans la peau (1 mm) de 4,9 °C et 8,7 °C ont été obtenues avec les mêmes valeurs de paramètres thermo-physiques, pour une exposition respectivement à 100 GHz et 1 THz.

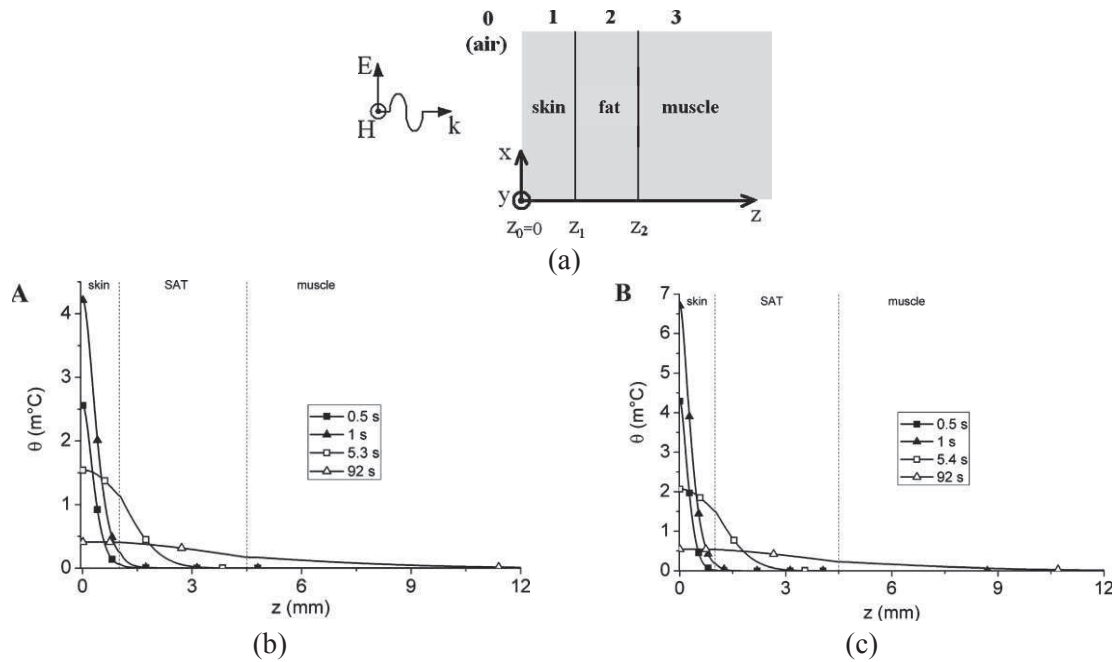


Figure IV.5 - (a) Illustration du modèle multicouche exposé à une onde plane (10 W/m^2) pris en compte dans [8] pour étudier la distribution d'élévation de température en régime transitoire dans les tissus pour des fréquences de (b) 100 GHz et (c) 1 THz.

1.2. Problématique

La synthèse des travaux bibliographiques concernant la modélisation du comportement thermique des tissus du corps humain en cas d'exposition à un champ électromagnétique, met en évidence que le modèle thermique de tissus multicouche est à privilégier au modèle homogène pour quantifier l'échauffement induit par une exposition du corps humain en bande millimétrique. En effet, contrairement à la profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique qui se limite aux couches superficielles du corps humain telle que la peau, l'échauffement thermique induit par l'absorption peut affecter les tissus en profondeur. Dans les travaux présentés, l'impact du flux sanguin, des épaisseurs de couches, ainsi que des paramètres thermo-physiques ont été analysés par le biais d'études paramétriques, mettant en avant notamment l'impact majeur du flux sanguin et de l'épaisseur de la couche de graisse dans le modèle, ainsi que des conditions d'échanges de chaleur aux interfaces avec l'air.

Avec l'accroissement permanent du nombre d'applications utilisant des dispositifs de communications à proximité du corps, l'utilisation de fantômes équivalents de tissus humains s'est fortement répandue pour les études dosimétriques expérimentales. Récemment, un fantôme homogène semi-solide, émulant les propriétés diélectriques de la peau humaine à 60 GHz a été développé à l'IETR [9]. Un tel fantôme assure des conditions de mesure stables et reproductibles. Ce fantôme est utilisable pour les études de propagation, d'interaction corps/antenne et de dosimétrie dans le cadre des BAN en bande millimétrique. Il est notamment utilisé pour déterminer les niveaux de DAS induit par le rayonnement d'antennes *on-body*. Les valeurs de DAS sont estimées à partir de la mesure de la dynamique d'élévation de température réalisée avec une technique d'imagerie thermo-infrarouge, auxquelles sont ajustés les résultats analytiques issus de la résolution de l'équation de bio-chaleur établie par Foster *et al.* pour un modèle de tissu semi-infini où seule la valeur relative à la densité de puissance incidente est inconnue. Avec cette

méthodologie [9] [10], le modèle analytique utilisé impacte directement la précision du résultat dosimétrique. Cependant, à notre connaissance, le comportement thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz n'a pas fait l'objet d'étude détaillée.

Ce chapitre vise à modéliser analytiquement le comportement thermique de fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz, lorsque celui-ci est exposé à une onde plane. Afin d'établir ce modèle, nous définissons en section 2 les différentes caractéristiques thermiques d'un matériau, ainsi que les différents modes de transfert de chaleur et les conditions aux interfaces d'un solide avec un autre milieu. Dans la section 3, la caractérisation des propriétés thermiques du fantôme et les valeurs mesurées sont présentées. Puis en section 4, une interprétation analytique des échanges thermiques dans le fantôme est proposée, suivie en section 5 par la résolution de l'équation de transfert de chaleur spécifique au modèle thermique du fantôme. Pour finir, en section 6, nous effectuons une analyse de convergence et une étude paramétrique de la solution de l'équation de transfert de chaleur afin d'évaluer les effets de certains paramètres du modèle sur l'échauffement du fantôme généré à la surface $z = 0$ et selon l'épaisseur du fantôme par l'exposition à une onde plane 60 GHz.

2. Notions de base en thermodynamique

2.1. Caractéristiques thermiques d'un matériau solide

Dans cette sous-section est présentée une revue non exhaustive des différentes propriétés permettant de caractériser thermiquement un matériau.

2.1.1. Conductivité thermique

La conductivité thermique est une grandeur physique caractérisant l'aptitude d'un milieu à conduire de la chaleur utilisée dans la loi de Fourier. Cette propriété thermique notée λ ou bien k dans la littérature, représente la quantité de chaleur transférée par unité de surface et par unité de temps sous l'action d'un gradient de température. Dans le système international d'unité, la conductivité thermique s'exprime en $W/(m \cdot ^\circ C)$ (ou $J/(m \cdot s \cdot ^\circ C)$). Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus le matériau est conducteur thermiquement, et inversement, plus la conductivité thermique d'un matériau est faible, plus le matériau présente un caractère d'isolant thermique.

Cette propriété est fortement liée à l'état de la matière. En général la conductivité thermique dans les matériaux solides est plus élevée que dans les liquides dont la conductivité est plus élevée que dans les gaz. Cependant, la conductivité est aussi dépendante de la température et de conditions de pression et d'humidité.

Le transport d'énergie dans un milieu par conduction est lié à deux phénomènes physiques :

(1) La migration des porteurs de charge libre dans un corps tel que les électrons. Ce qui induit donc un lien étroit avec la conductivité électrique σ (S/m).

(2) Les vibrations des atomes et de leurs arrangements périodiques. Il est important de préciser que plus la structure est ordonnée (cristal, diamant, etc), plus la contribution de ce phénomène sur la valeur de la conduction thermique est importante.

Le Tableau IV.1 donne quelques exemples de conductivité thermique.

Tableau IV.1 - Conductivité thermique à 25 °C [11].

Matériaux	Conductivité thermique k ($W/(m \cdot ^\circ C)$)	Caractère thermique
<i>Air</i>	0,026	Isolant
<i>Bois</i>	0,150	Isolant
<i>Eau</i>	0,600	Isolant
<i>Cuivre</i>	390	Conducteur
<i>Diamant</i>	2300	Conducteur

2.1.2. Capacité thermique massique

La capacité thermique massique anciennement connue sous le nom de « *chaleur massique* » ou bien « *chaleur spécifique* » qu'on note généralement c , caractérise la capacité d'un matériau à absorber ou bien restituer de la chaleur. Exprimée dans le système international en $J/(kg \cdot ^\circ C)$, cette grandeur définit la quantité d'énergie en Joule qui doit être fournie sous forme de chaleur pour augmenter de 1 °C la température d'une masse de 1 kg d'un matériau ou substance donnée. Le

Tableau IV.2 qui suit fournit quelques valeurs de capacité thermique massique pour divers matériaux.

Tableau IV.2- Capacité thermique massique à 25 °C [11].

Matériaux	Capacité thermique massique c (J/(kg·°C))
<i>Cuivre</i>	385
<i>Diamant</i>	509
<i>Air</i>	1005
<i>Bois</i>	1255-2805
<i>Eau (liquide)</i>	4185

2.1.3. Diffusivité thermique

La diffusivité thermique quantifie le comportement thermique dynamique d'un solide. C'est une grandeur physique qui exprime la capacité d'un matériau à transmettre de la chaleur d'un point à un autre. Souvent désigné par la lettre D , la diffusivité thermique s'exprime en m^2/s et dépend de la capacité du matériau à conduire de la chaleur ainsi que de sa capacité à en accumuler, d'où l'expression analytique suivante :

$$D = \frac{k}{\rho \cdot c} \quad (11)$$

où ρ , c et k sont respectivement la masse volumique (kg/m^3), la capacité thermique ($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$) et la conductivité thermique ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$) du matériau solide.

2.1.4. Emissivité

L'émissivité est la propriété radiative d'une surface ; elle décrit la capacité d'un matériau à absorber ou bien émettre de l'énergie sous forme de rayonnement. Les matériaux réels réémettent toujours une quantité d'énergie inférieure à celle d'un corps noir à la même température. Un corps noir désigne un matériau idéal réémettant la totalité de son énergie sur tout le spectre.

Physiquement, l'émissivité représente le rapport entre le flux de chaleur émis par le matériau réel sur celui émis par le corps noir à une même température

$$e = \frac{q_{\text{matériau réel}}}{q_{\text{corps noir}}} \quad (12)$$

L'émissivité est un nombre sans unité dont une valeur est comprise entre 0 et 1. Dans le cas de la peau humaine, l'émissivité est proche de 1 ($\approx 0,98$) et dépend de la concentration en eau dans les tissus [12].

2.1.5. Effusivité thermique

L'effusivité thermique d'un matériau notée E est une grandeur physique caractérisant sa capacité à échanger de l'énergie thermique avec son environnement. Son unité dans le système international est le $\text{J}/(^{\circ}\text{C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$. Elle est reliée analytiquement à la conductivité et la capacité thermique par l'expression suivante :

$$E = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c}. \quad (13)$$

Plus l'effusivité d'un matériau est élevée, plus le matériau est capable d'absorber de l'énergie en limitant son échauffement. Et au contraire, plus un matériau a une émissivité faible et plus il aura tendance à s'échauffer. Pour illustrer ce phénomène, il suffit de faire un test simple qui consiste à toucher avec la paume de la main ($E_{\text{peau}} \approx 400 \text{ J}/(\text{°C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$) deux matériaux à même température (20 °C) : un matériau à faible effusivité thermique tel que le bois ($E_{\text{bois}} \approx 400 \text{ J}/(\text{°C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$) et un autre à forte effusivité tel que le cuivre ($E_{\text{cuivre}} \approx 14\,400 \text{ J}/(\text{°C} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{1/2})$). Le matériau à faible effusivité donnera la sensation d'être plus chaud que le matériau à forte émissivité.

2.1.6. Dilatation thermique

Dans un matériau solide, les atomes possèdent une certaine énergie thermique et vibrent autour d'une position moyenne. La vibration des atomes dépend de la température. Ce phénomène de dilatation est caractérisé par le coefficient de dilatation thermique β qui quantifie l'augmentation du volume d'un matériau à pression constante lorsqu'on fait varier sa température. Ce coefficient s'exprime en °C^{-1} par

$$\beta = \frac{1}{V} \left(\frac{\delta V}{\delta T} \right)_P, \quad (14)$$

où V est le volume en m^3 et P la pression constante.

2.2. Modes de transfert de chaleur

Il est important de comprendre les différents mécanismes physiques qui induisent les transferts de chaleur pour pouvoir évaluer et quantifier les échauffements dans un matériau. Les différents modes ou procédés de transfert de chaleur sont la conduction, la convection et le rayonnement.

2.2.1. Conduction

La conduction thermique définit le mode de transfert de chaleur induit par un gradient de température au sein d'un même milieu. La chaleur est alors transférée d'un point chaud vers un point froid du milieu sous l'effet de l'agitation thermique qui se propage entre particules de proche en proche.

Ce mode de transfert de chaleur est décrit mathématiquement par la loi de Fourier qui dans le cas d'une paroi plane 1D (Figure IV.6) est exprimée par

$$q_{\text{cond}} = -k \frac{\delta T}{\delta z} \quad (15)$$

où q_{cond} est le flux thermique (W/m^2) qui caractérise le débit de chaleur. Ce flux thermique est proportionnel au gradient de température $\delta T/\delta z$ ($\text{°C}/\text{m}$) et à la conductivité thermique k ($\text{W}/(\text{m} \cdot \text{°C})$).

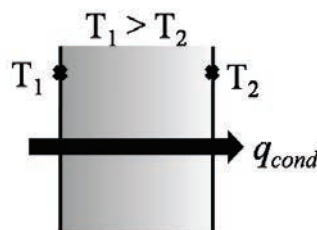


Figure IV.6 - Illustration 1D du mode de transfert de chaleur par conduction dans un milieu solide.

2.2.2. Convection

La convection définit les transferts de chaleur se produisant à l'intérieur d'un fluide ou bien entre un fluide en mouvement et la surface d'un milieu solide lorsqu'il existe un gradient de température entre les deux (Figure IV.7). Ce mode de transfert de chaleur permet de déterminer la quantité de chaleur échangée entre un fluide et une paroi dans le temps. Il dépend du gradient de température entre le fluide et la paroi, de la capacité thermique massique du fluide, de la dimension de la surface d'échange et de la vitesse du fluide, etc. Il existe différentes classes de transferts de chaleur par convection liées aux caractéristiques du fluide. En effet, on parle de convection forcée lorsque le mouvement du fluide est contrôlé par un dispositif extérieur (pompe, ventilateur, etc), ou bien de convection libre ou naturelle quand le mouvement est imposé par les seules forces de poussées induites par les variations de température ou de densité dans le fluide.

Mathématiquement, ce mode de transfert de chaleur par convection s'exprime par la loi de Newton qui donne la quantité de chaleur q_{conv} (W/m²) échangée sur une portion de la paroi d'un solide à la température T_s (K) avec un fluide à la température T_f :

$$q_{conv} = h_c(T_s - T_f), \quad (16)$$

avec h_c le coefficient d'échange thermique par convection (W/(m²·K)). Ce coefficient est compris entre 2 et 25 W/(m²·K) pour un gaz tel que l'air dans le cas où la convection est naturelle.

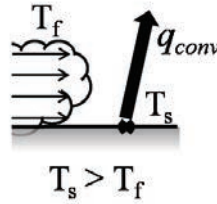


Figure IV.7 - Illustration 1D du mode de transfert de chaleur par convection entre un fluide et un milieu solide.

2.2.3. Rayonnement

Contrairement aux modes de transfert de chaleur par conduction ou convection qui sont principalement liés à une différence de température, le transfert de chaleur par rayonnement est fortement lié au niveau de la température. En effet, suivant la température d'un matériau, son rayonnement thermique sera différent ; ce phénomène s'explique par la loi de Planck qui définit la distribution de luminance spectrale d'énergie du rayonnement thermique d'un corps noir à l'équilibre thermique en fonction de sa température. Précisons que le transfert d'énergie par rayonnement thermique est maximal dans le cas d'un corps noir dont l'émissivité est égale à 1. De plus, c'est le seul type de transfert pouvant se faire dans le vide, car l'énergie rayonnée est transportée par une onde électromagnétique.

C'est la loi de Stephan-Boltzmann qui permet de quantifier ce type d'échange thermique. Cette loi exprime le flux de chaleur échangé q_{rad} (W/m²) par une surface à température T_s (K) avec l'environnement à température T_{env} (Figure IV.8) :

$$q_{rad} = e \cdot \sigma(T_s^4 - T_{env}^4) \quad (17)$$

où e est l'émissivité de la surface ($0 < e < 1$) et σ la constante de Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} W/(m²·K⁴)).

Cependant, pour de nombreuses applications, il convient d'exprimer l'échange thermique par rayonnement sous la forme suivante :

$$q_{rad} = h_r(T_s - T_{env}), \quad (18)$$

avec h_r est le coefficient d'échange de chaleur par rayonnement ($W/(m^2 \cdot K)$)

$$h_r = e \cdot \sigma(T_s^2 + T_{env}^2)(T_s + T_{env}). \quad (19)$$

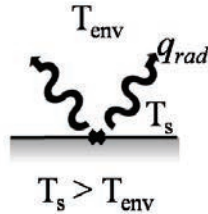


Figure IV.8 - Illustration 1D du mode de transfert de chaleur par rayonnement.

2.3. Conditions aux limites

Le flux thermique et la distribution de température dans un matériau dépendent des mécanismes de transfert de chaleur internes au matériau mais aussi des conditions aux limites à ses interfaces, ainsi que des conditions initiales [13]. En effet, la description des transferts de chaleur régissant le flux de chaleur dans un matériau solide n'est pas complète sans l'expression des conditions de transfert thermique à ces surfaces appelées *conditions aux limites*. Dans le cas des problèmes thermiques 1D, deux conditions limites sont nécessaires.

Plusieurs conditions limites peuvent être rencontrées en pratique. Les sous-sections qui suivent vont présenter les conditions limites interprétant les phénomènes de transfert de chaleur aux interfaces entre deux milieux solides ainsi qu'entre un milieu solide et un fluide.

2.3.1. Interface solide/solide

La condition limite à l'interface (x_0) entre deux matériaux solides (matériaux A et B) en contact, garantit deux hypothèses importantes. La première est qu'à l'interface des deux matériaux la température est la même (20) et la seconde est qu'il n'y a pas de stockage d'énergie à l'interface, c'est-à-dire que le flux de chaleur doit être identique de chaque côté de l'interface (21). Ces hypothèses qui sont illustrées en Figure IV.9 s'expriment sous la forme analytique suivante :

$$T_A(x_0, t) = T_B(x_0, t) \quad (20)$$

et

$$-k_A \frac{\partial T_A(x_0, t)}{\partial z} = -k_B \frac{\partial T_B(x_0, t)}{\partial z} \quad (21)$$

où k_A et k_B sont respectivement les coefficients de conductivité thermique des matériaux A et B , et $T_A(x_0, t)$ ou $T_B(x_0, t)$ les températures des matériaux à l'interface x_0 à un même instant t .

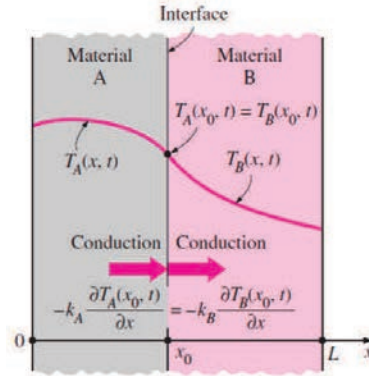


Figure IV.9 -Illustration des conditions limites à l'interface entre deux matériaux solides en contact [13].

2.3.2. Interface fluide/solide

Plusieurs phénomènes physiques peuvent être impliqués dans les transferts de chaleur au niveau des interfaces entre un matériau solide et un fluide comme par exemple l'air, impliquant donc la possibilité de combiner plusieurs types de conditions limites.

▪ Conditions limites à températures imposées

Ce type de condition limite s'applique lorsque les températures sur les surfaces d'un matériau solide sont imposées (Figure IV.10a). On parle de problème de Dirichlet ou bien de conditions limites de Dirichlet. Mathématiquement, les conditions limites s'expriment aux interfaces d'un matériau 1D d'épaisseur L de la manière suivante :

$$T(0, t) = T_1 \quad (22)$$

et

$$T(L, t) = T_2 \quad (23)$$

où T_1 et T_2 sont les températures respectivement imposées aux interfaces $x = 0$ et $x = L$. Ces températures peuvent varier dans le temps.

Ce type de condition limite peut servir à caractériser le transfert de chaleur se produisant lors du changement d'état d'un milieu (évaporation, condensation, ébullition, etc.). En effet, la température de changement d'état peut être considérée dans ce cas comme la température imposée.

▪ Conditions limites à flux thermiques imposés

Dans le cas des conditions limites à flux thermique constant, le flux de chaleur sur les interfaces est imposé : on parle alors de problème ou de condition de Neumann. Ce type de condition limite a une expression mathématique semblable à la loi de Fourier ; par exemple dans le cas 1D de la Figure IV.10b on a :

$$q_0 = -k \frac{\delta T(0, t)}{\delta z} \quad (24)$$

et

$$q_L = -k \frac{\delta T(L, t)}{\delta z} \quad (25)$$

avec q_0 le flux de chaleur imposé sur la surface du matériau en $x = 0$ et q_L celui à la surface $x = L$.

■ Conditions limites mixtes

Les conditions mixtes cherchent à modéliser les transferts de chaleur entre la paroi d'un matériau et le milieu extérieur comme par exemple de l'air. Ce type de condition limite prend donc en compte les modes de transfert de chaleur convectifs et radiatifs de la manière suivante :

$$-k \frac{\partial T(0, t)}{\partial x} = h_{c1}(T_{env1} - T(0, t)) + e_1 \cdot \sigma(T_{env1}^4 - T(0, t)^4) \quad (26)$$

et

$$-k \frac{\partial T(L, t)}{\partial x} = h_{c2}(T(L, t) - T_{env2}) + e_2 \cdot \sigma(T(L, t)^4 - T_{env2}^4) \quad (27)$$

où h_{c1} et h_{c2} sont les coefficients de transfert par convection, e_1 et e_2 les émissivités des surfaces en contact avec l'air, et T_{env1} (K) et T_{env2} (K) les températures des milieux avoisinant les deux parois du matériau. Il est important de souligner que, dans les calculs de rayonnement, la température doit être exprimée en degrés Kelvin et non en Celsius. Dans le cas où l'échange de chaleur est uniquement convectif ou bien uniquement radiatif, il peut respectivement être schématisé soit comme en Figure IV.10c et soit par la Figure IV.10d.

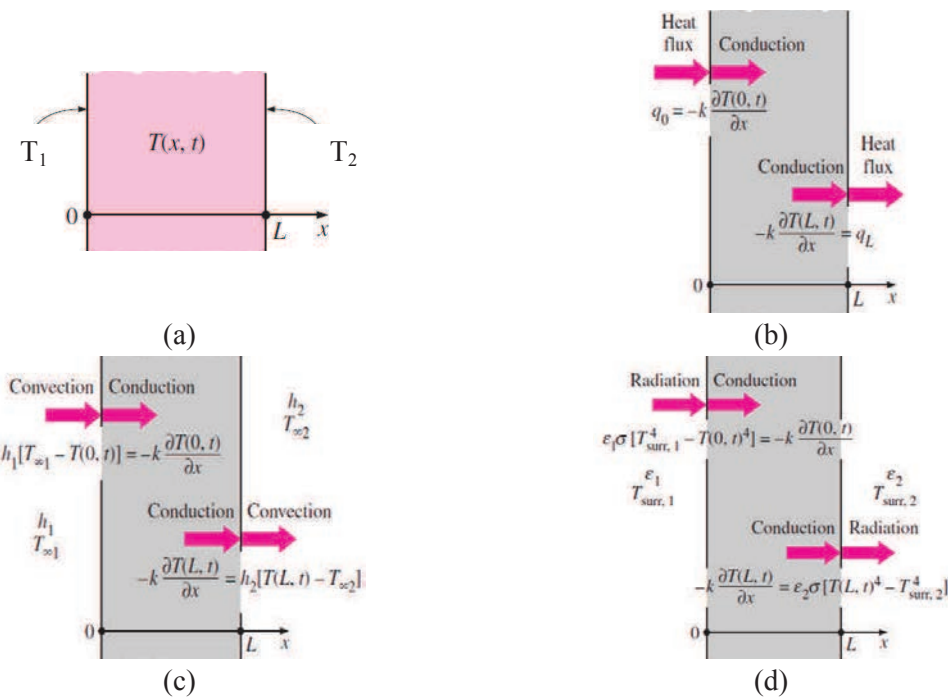


Figure IV.10 - Illustration des possibles conditions limites aux interfaces air/solide. (a) Températures imposées, (b) flux de chaleur imposé, (c) dissipation par convection et (d) dissipation par rayonnement [13].

3. Caractéristiques thermo-physiques du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz

Les précisions des valeurs des paramètres thermo-physiques (c , k et ρ) du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz utilisées pour la modélisation de son comportement thermique, peuvent directement impacter la dynamique et la distribution de l'élévation de température durant l'exposition, et donc la précision du résultat dosimétrique puisque le DAS est fonction de la dynamique de l'élévation de température initiale.

Dans [9], les propriétés thermiques du fantôme équivalent (c et k) sont estimées à partir de données expérimentales obtenues pour des fantômes semi-solides similaires mais dont les proportions des constituants sont différentes, car les fantômes ont été développés pour des utilisations dans des bandes de fréquence beaucoup plus basses (entre 300 MHz et 2,5 GHz) [14]. Pour assurer une bonne précision à nos résultats, les caractéristiques thermo-physiques du fantôme de la peau à 60 GHz ont été évaluées expérimentalement.

Les mesures des paramètres thermiques qui sont présentés dans ce qui suit ont été réalisées au sein du Laboratoire de Thermocinétique de Nantes (LTN) disposant du matériel nécessaire pour ce type de mesure. Pour chaque propriété thermique, deux types d'échantillon ont été mesurés : (1) un échantillon de fantôme équivalent de la peau composée d'eau, de poudre de polyéthylène, d'agar, et de TX-151 [9] ; et (2) un échantillon de fantôme d'eau gélifiée à 4 % d'agar.

3.1. Capacité thermique du fantôme

3.1.1. Méthode de caractérisation

La capacité thermique d'un matériau est mesurée par une méthode de caractérisation thermique appelée calorimétrie différentielle à balayage ou DSC (Differential Scanning Calorimetry) [15]. Cette méthode permet d'analyser le comportement d'un matériau lorsque sa température varie. Elle est basée sur la mesure de l'enthalpie associée au changement de phase physique du matériau (cristallisation, fusion, etc.).

Le calorimètre mesure, via des thermocouples reliés à un système d'acquisition sur ordinateur, la différence de températures entre l'échantillon du matériau à analyser et un échantillon référence (souvent l'air) placé dans deux capsules différentes (Figure IV.11). Cette méthode permet de déterminer c en comparant les flux de chaleur nécessaires pour augmenter la température de l'échantillon de 1 °C avec une précision de ± 5 %.

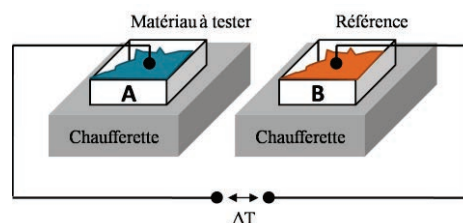


Figure IV.11 - Principe de la méthode calorimétrique différentielle à balayage utilisée pour déterminer expérimentalement c , la capacité thermique massique d'un matériau.

3.1.2. Protocole expérimental

- **Préparation des échantillons de mesure**

Pour les mesures, des échantillons de quelques milligrammes prélevés au cœur de la matière suffisent à la caractérisation. Les échantillons prélevés sont ensuite placés dans des capsules (diamètre < 1 cm) (Figure IV.12a).

- **Etalonnage du système d'acquisition**

Avant de réaliser les mesures des échantillons, il est important d'étalonner le système d'acquisition. Pour ce faire, deux capsules vides sont placées dans le calorimètre (Figure IV.12b), afin de mesurer et compenser l'écart de température mesuré entre les thermocouples qui fausserait l'estimation de la valeur de c .

- **Détermination des températures caractéristiques des matériaux**

Une des capsules vides placée dans le calorimètre est remplacée après étalonnage par une capsule contenant l'échantillon de matériau à caractériser. Les températures de changement de phase du matériau sont établies en évaluant les variations d'enthalpie sur une gamme de température donnée. Cette évaluation est importante dans le cas des échantillons de fantômes en raison de leur forte teneur en eau, car on veut éviter de caractériser les fantômes en dessous de leurs températures de cristallisation. Ce changement d'état serait très impactant sur l'estimation des valeurs mesurées de capacité thermique.

- **Mesures et post-traitement pour déterminer les valeurs de c**

Les mesures de chaque échantillon sont réalisées par paliers de température de 5 °C, chaque mesure dure entre 2 et 5 min. Elles sont enregistrées via le système d'acquisition qui permet d'observer l'évolution du flux de chaleur traversant les deux capsules ou bien leur température. Ces données permettent ensuite par post-traitement de déterminer les valeurs de la capacité thermique des échantillons c .



(a)



(b)

Figure IV.12 - Illustration des capsules dans lesquelles sont placées des échantillons. (a) Exemples de capsules, et (b) capsules positionnées dans la DSC.

3.1.3. Résultats

Le balayage en température du comportement thermique des échantillons a montré que la température de cristallisation dans le cas du fantôme équivalent de la peau humaine se situe autour de - 6 °C et celle du fantôme d'eau gélifiée autour de - 2,5 °C.

La gamme de température sur laquelle sont mesurées les capacités thermiques de chaque matériau s'étale de 0 °C à 30 °C (Figure IV.13). Les valeurs de c à 20 °C sont présentées dans le Tableau IV.3, et sont comparées à la valeur pour la peau humaine *in-vivo*.

Pour le fantôme d'eau gélifiée la capacité thermique moyenne sur la gamme de température 0 °C à 30 °C est de 3779 J/(kg·°C) avec un écart type de 8,94 J/(kg·°C). En ce qui concerne le fantôme de la peau humaine, la valeur moyenne est de 3472 J/(kg·°C) avec un écart type de 17,08 J/(kg·°C). Il est important de souligner que la capacité thermique mesurée à 20 °C, pour le fantôme équivalent, est très proche de la valeur pour la peau humaine *in-vivo* [16] puisque la déviation est inférieure à + 2,5 % (Tableau IV.3).

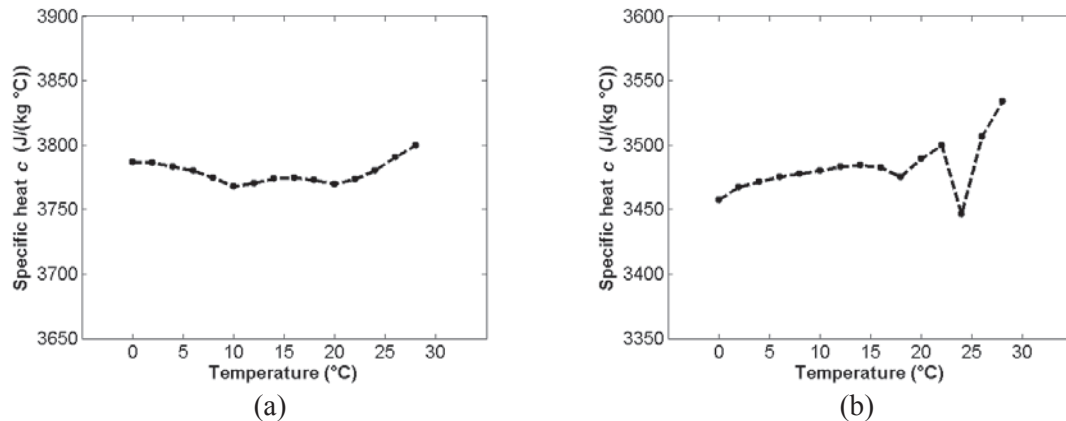


Figure IV.13 - Capacités thermique c mesurées sur la gamme de température entre 0 °C et 30 °C pour (a) le fantôme d'eau gélifiée et (b) le fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz

3.2. Conductivité thermique du fantôme

3.2.1. Méthode de caractérisation

Pour mesurer la conductivité thermique d'un matériau, il existe plusieurs méthodes. La méthode de mesure dite de la plaque chaude gardée (ISO 8302) est généralement utilisée en régime établi ; la méthode du fil chaud (ISO 8894) ou les sondes thermiques sont des méthodes utilisées en régime quasi-établi ; dans le cas de mesures en régime transitoire, des méthodes dites flash sont utilisées [17].

Pour les mesures des conductivités thermiques des fantômes, c'est un conductimètre utilisant la méthode dite de la plaque chaude gardée qui a été utilisé. Le principe de mesure est illustré en Figure IV.14. L'échantillon de matériau à caractériser est placé sur une chaufferette alimentée par un courant électrique I (A) entre un échangeur froid maintenu constant à 15 °C et un échangeur chaud lui à 25 °C permettant une mesure caractéristique à 20 °C. Des thermocouples de 80 μ m de diamètres sont utilisés pour mesurer la température au niveau des différentes interfaces du dispositif de mesure (T_1 : température en surface de l'échangeur chaud, T_2 : température sur la face inférieure de la chaufferette, T_3 : température sur la face supérieure de la chaufferette et T_4 : température en surface de l'échangeur froid). Les données de ces thermocouples sont enregistrées et traitées via un système d'acquisition relié à un ordinateur.

Lorsque $T_1 = T_2$, le flux de chaleur ϕ (W) dissipé par la chaufferette est alors entièrement dirigé vers l'échantillon. Le gradient de température dans l'échantillon est stable, le régime établi étant atteint.

En régime permanent, la densité du flux de chaleur q (W/m²) s'exprime par la loi de Fourier, laquelle relie la différence de température entre les deux interfaces de l'échantillon ($T_4 - T_3$) à la conductivité thermique par l'équation :

$$q = \frac{\phi}{S} = \frac{U \cdot I}{d^2} = k \frac{T_4 - T_3}{L} \quad (28)$$

où S est la surface de l'échantillon (m²), U la tension aux bornes de la chaufferette (V), d la dimension de l'échantillon (m) et L l'épaisseur de l'échantillon (m).

Il est alors possible d'exprimer et de déterminer la valeur de la conductivité avec l'expression suivante où la précision est de $\pm 5\%$:

$$k = \frac{U \cdot I}{d^2} \frac{L}{T_4 - T_3} \quad (29)$$

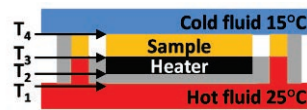


Figure IV.14 -Schéma de principe de la mesure de la conductivité thermique par la méthode de la plaque chaude gardée.

3.2.2. Protocole expérimental

■ Préparation des échantillons de mesure

Pour la mesure de conductivité thermique, des échantillons aux dimensions 15 mm \times 15 mm et avec une épaisseur n'excédant pas 5 mm sont nécessaires, ainsi que des gardes d'épaisseur égale à celle de l'échantillon aux dimensions 40 mm \times 40 mm évidées de 20 mm \times 20 mm en leur centre (Figure IV.15a).

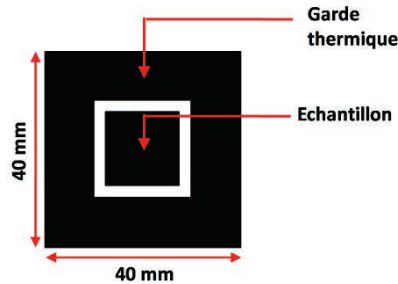


Figure IV.15 - Représentation schématique de l'échantillon à mesurer et de sa garde thermique.

■ Mise en place de l'échantillon et lancement de la mesure

L'échantillon à mesurer est placé sur la chaufferette et l'échangeur chaud (Figure IV.16a) au centre de la garde thermique. Sur chaque face de l'échantillon et de la garde, une pâte conductrice est appliquée afin d'assurer les contacts avec le dispositif de mesure. Une fois l'échantillon installé, l'échangeur froid est amené en contact de l'échantillon grâce à un vérin hydraulique (Figure IV.16b), permettant de maintenir l'échantillon isolé. Une fois le dispositif fermé on ne distingue que les bords de la garde thermique (Figure IV.16c). L'enregistrement des différents paramètres peut être lancé. La mesure de la conductivité est d'environ 1 h, qui correspond au temps nécessaire pour que le système atteigne le régime permanent.

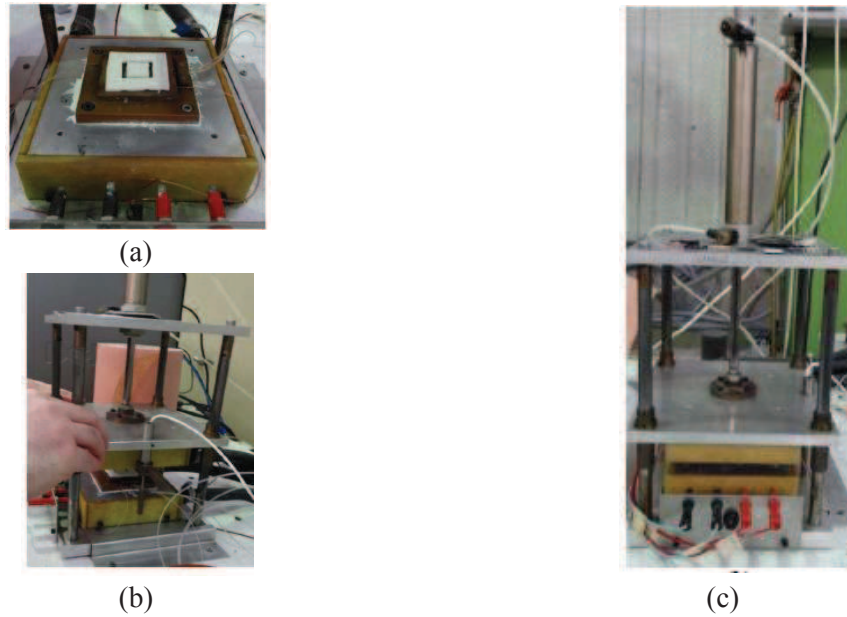


Figure IV.16 -Photographies des différentes étapes de la procédure de mesure suivie pour la conductivité thermique k . (a) Mise en place de l'échantillon et de sa garde, (b) fermeture du système par le positionnement de l'échangeur froid et (c) système fermé.

3.2.3. Résultats

Les mesures de conductivité thermique, contrairement à la capacité thermique sont effectuées à une seule température à savoir 20 °C, qui est la température ambiante moyenne d'une pièce dans un bâtiment. Les valeurs mesurées pour chaque fantôme sont données dans le Tableau IV.3.

Comme dans le cas de la capacité thermique, on peut noter que la valeur de conductivité mesurée pour le fantôme équivalent de la peau humain est proche de celle de la peau humaine [16]. L'écart avec la valeur pour la peau *in vivo* est seulement de + 3,8 %.

Tableau IV.3 - Propriétés thermo-physiques du fantôme d'eau gélifiée et du fantôme de la peau humaine à 20 °C, ainsi que de la peau humaine *in vivo*.

Echantillons	c (J/(kg·°C))	k (W/(m·°C))	ρ (kg/m ³)
Fantôme d'eau gélifiée	3770	0,663	1000
Fantôme de la peau	3480	0,386	880 [9]
Peau humaine [16]	3396	0,372	1109

4. Expression analytique des transferts de chaleur dans un fantôme exposé à une onde électromagnétique

4.1. Modèle d'exposition considéré

Les illustrations présentées en Figure IV.17, montrent les différences principales entre le modèle thermique 1D de tissu homogène semi-infini [4] utilisé pour évaluer le DAS à partir de données d'élévation de température expérimentales et celui spécifique au modèle du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz d'épaisseur finie.

Contrairement aux modèles de tissus présentés en section 1.1, le fantôme utilisé en mesure est généralement d'épaisseur finie L et ne présente pas de système interne de refroidissement/dissipation de chaleur tel que la circulation sanguine dans le corps. Cela se traduit donc par deux différences majeures entre ces deux modèles. La première est que le fantôme (Figure IV.17b) présente deux surfaces en $z = 0$ et en $z = L$ en contact avec le milieu extérieur, c'est-à-dire l'air, alors que le modèle de tissu semi-infini (Figure IV.17a) n'en présente qu'une seule en $z = 0$. La deuxième est que, dans le cas du fantôme, il n'y pas de paramètre relatif au flux sanguin f_s contrairement au modèle relatif au tissu.

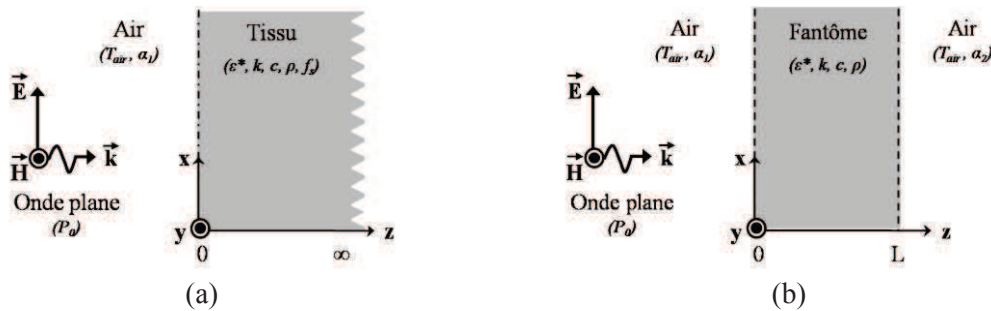


Figure IV.17 - Modèles (a) de tissu semi-infini et (b) de fantôme à épaisseur finie L exposés à une onde plane en incidence normale.

4.2. Equation de transfert de chaleur

Le modèle du fantôme homogène est considéré infini suivant les directions x ou y , et d'épaisseur finie L suivant z (Figure IV.17b). Le fantôme est exposé à une onde plane en incidence normale à 60 GHz. Pour ce modèle la diffusion thermique dans le fantôme peut être décrite analytiquement par l'équation de transfert de chaleur (HTE) différentielle non-homogène suivante

$$\frac{\rho \cdot c}{k} \frac{\partial T(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 T(z, t)}{\partial z^2} + q(z), \quad (30)$$

où $T(z, t)$ désigne l'élévation de température ($^{\circ}\text{C}$) à la profondeur z du fantôme et à l'instant t , c'est-à-dire la différence entre la température absolue du fantôme à un instant t ($T_{\text{fantôme}}(z, t)$) et la température initiale ($T_{\text{fantôme}}(z, 0)$)

$$T(z, t) = T_{\text{fantôme}}(z, t) - T_{\text{fantôme}}(z, 0) \quad (31)$$

$q(z)$ est la chaleur générée par l'absorption électromagnétique qui se traduit analytiquement d'après les travaux de Foster *et al.* [4] par

$$q(z) = q_0 e^{-\frac{2 \cdot z}{\delta}} = \frac{2 \cdot P_0 (1 - R)}{\delta \cdot k} e^{-\frac{2 \cdot z}{\delta}} \quad (32)$$

où le coefficient R et la profondeur δ dépendent de la fréquence d'exposition et des propriétés diélectriques du fantôme (Figure IV.18).

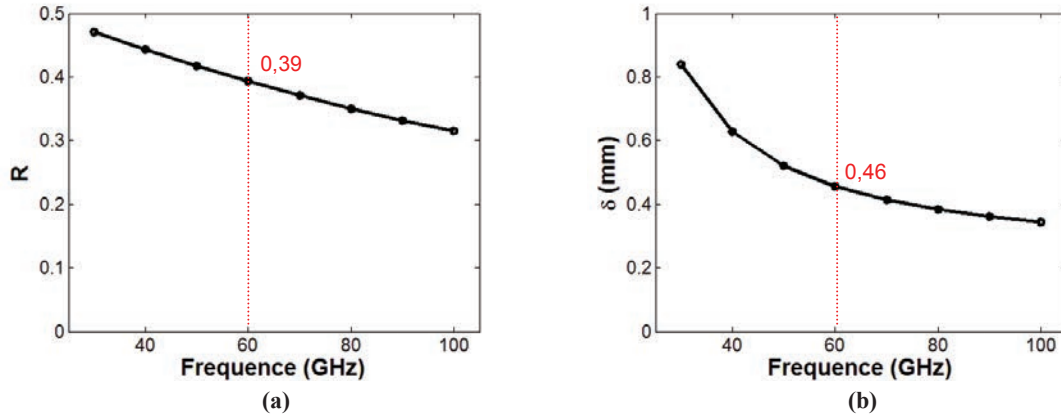


Figure IV.18 - Dépendance en fréquence de la valeur (a) du coefficient de réflexion en puissance R et (b) de la profondeur de pénétration du rayonnement dans le fantôme sur la bande 30-100 GHz.

4.3. Conditions spécifiques au modèle

Comme expliqué dans la section 2.3 de ce chapitre, le comportement thermique d'un matériau est non seulement lié aux mécanismes internes de transfert de chaleur, mais aussi à la condition initiale ainsi qu'aux conditions limites qui gèrent les échanges thermiques avec le milieu extérieur. Il est donc indispensable d'établir ces conditions pour compléter le modèle analytique du fantôme d'épaisseur finie.

4.3.1. Condition initiale

Il est supposé, qu'avant l'exposition du fantôme, le système est stable et que la température absolue du fantôme $T_{\text{fantôme}}(z, t)$ est égale à la température du milieu dans lequel se situe le fantôme, c'est à dire T_{air} quel que soit z . Cette hypothèse amène à la condition initiale suivante :

$$T(z, 0) = T_{\text{fantôme}}(z, 0) - T_{\text{air}} = 0, \quad \forall z. \quad (33)$$

Dans le cas du modèle du corps humain, la condition initiale fournit le gradient de température qui apparaît entre la surface du tissu soumis aux pertes thermiques avec le milieu environnant et la température de corps dans la profondeur des tissus, lorsque $T_{\text{air}} \neq T_{\text{corps}}$.

4.3.2. Conditions aux interfaces

Les modes de transfert thermique entre les parois du fantôme et le milieu environnant sont convectifs et radiatifs [13]. Ces transferts thermiques imposent donc des conditions limites dites mixtes. Les transferts de chaleur aux interfaces sont ainsi décrits analytiquement en $z = 0$ par :

$$\frac{\partial T(0, t)}{\partial z} = \alpha_1 \cdot T(0, t), \quad t \geq 0, \quad (34)$$

et en $z = L$ par

$$\frac{\partial T(L, t)}{\partial z} = -\alpha_2 \cdot T(L, t), \quad t \geq 0, \quad (35)$$

où le coefficient α_i est égal au rapport h_i/k , avec h_i le coefficient de transfert de chaleur ($W/(m^2 \cdot ^\circ C)$) du fantôme vers l'air. Ce coefficient prend en compte différents mécanismes,

$$h_i = h_{ci} + h_{ri} + h_{ei} \quad (36)$$

où h_{ci} est le coefficient de transfert de chaleur par convection, h_{ri} le coefficient de transfert de chaleur par rayonnement et h_{ei} le coefficient de transfert de chaleur par évaporation.

Pour le corps humain, le coefficient h_{ci} dépend de la forme, des dimensions et de la posture du corps ou du membre exposé [3] [18]. Il est possible d'évaluer la valeur de ce coefficient dans le cas du corps humain à partir des données fournies dans [19]. A notre connaissance, il n'existe pas de bases de données équivalentes pour les fantômes. Cependant, une estimation de la valeur h_{ci} est possible dans le cas du fantôme via les nombres empiriques de Nusselt, Reynolds ou Rayleigh [11] pour des gammes de température et de vitesses de déplacement du fluide données.

En ce qui concerne le coefficient de transfert par rayonnement, il dépend de la température du fantôme et varie donc avec l'augmentation de température du fantôme. Ce coefficient peut être calculé à partir de l'expression :

$$h_r = e \cdot \sigma (T_{fant\ôme}^2(0, t) + T_{air}^2) (T_{fant\ôme}(0, t) + T_{air}) \quad (37)$$

où e est l'émissivité de la surface du fantôme, et σ la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$). Attention dans cette formule les températures s'expriment en degré Kelvin.

Le coefficient de transfert de chaleur par évaporation peut avoir un effet majeur sur la dissipation de chaleur par le corps humain lorsque ce dernier est en activité, par le biais de mécanismes biologiques comme la sudation. En revanche, dans le cas de notre fantôme, la dissipation de la chaleur liée à ce changement de phase de l'eau est négligeable. Plusieurs séries de mesure sur 1 h de la permittivité complexe du fantôme ont été effectuées dans des conditions équivalentes à celles d'exposition du fantôme, montrant de faibles variations de la permittivité complexe du fantôme sur la bande 55-65 GHz (écart-type entre les mesure de $\epsilon' \pm 0,34$ et de $\epsilon'' \pm 0,45$). Pour ces mesures de permittivité, nous avons utilisé la sonde *Slim Form Prob* du kit de sondes diélectriques 85070E de chez Agilent. Cette sonde permet de mesurer les propriétés diélectriques sur une bande de fréquence s'étalant de 500 MHz à 50 GHz de liquides ou de matériaux semi-solides avec une précision de $\pm 0,05$ sur la partie réelle et imaginaire [20]. Dans l'étude nous supposons pour le fantôme $h_{ei} = 0 W/(m^2 \cdot K)$.

5. Résolution de l'équation de transfert de chaleur

L'équation de transfert de chaleur spécifique au modèle thermique du fantôme d'épaisseur finie (30) est une équation différentielle du second ordre inhomogène en raison de l'intervention d'un membre secondaire $q(z)$. La solution analytique $T(z,t)$ de l'équation de transfert (30) est obtenue en sommant les solutions relatives (1) à l'équation en régime établi $v(z)$ et (2) à l'équation en régime transitoire mais sans membre secondaire, donc sans terme source d'exposition $w(z,t)$ [21].

$$T(z, t) = v(z) + w(z, t). \quad (38)$$

5.1. Solution en régime établi

L'équation de transfert de chaleur spécifique au fantôme d'épaisseur finie exposé à une onde plane s'exprime en régime établi par

$$\frac{\partial^2 v(z)}{\partial z^2} = -q(z), \quad (39)$$

avec $v(z)$ l'élévation de température en régime établi ($^{\circ}\text{C}$) et $q(z)$ le membre secondaire relatif à l'échauffement induit par l'absorption du rayonnement électromagnétique.

Cette équation (39) possède des conditions limites équivalentes en $z = 0$ et $z = L$ à celles de (30), c'est-à-dire

$$\frac{\partial v(0)}{\partial z} = \alpha_1 \cdot v(0), \quad (40)$$

et

$$\frac{\partial v(L)}{\partial z} = -\alpha_2 \cdot v(L). \quad (41)$$

L'équation (39) est une équation différentielle du second ordre de type

$$a \cdot y''(z) = b, \quad (42)$$

dont la solution est la somme de l'équation homogène ($b = 0$) et de la solution inhomogène/particulière ($b \neq 0$)

$$y(z) = y_{b=0}(z) + y_{b \neq 0}(z). \quad (43)$$

La méthode utilisée pour résoudre ce type d'équation est la méthode dite des coefficients indéterminés (**Annexe D**), qui donne une solution $v(z)$ dont la forme générale est la suivante,

$$v(z) = C_1 + C_2 + C_3 e^{-2z/\delta}, \quad (44)$$

où C_1 , C_2 et C_3 sont des coefficients constants. C_1 et C_2 sont spécifiques aux conditions limites du modèle. Pour obtenir leurs expressions, $v(0)$ et $v(L)$ ainsi que leurs dérivées premières $dv(0)/dz$ et $dv(L)/dz$ sont remplacées dans les conditions limites (40) et (41) par leurs formes générales établies à partir de (44), aboutissant à un système d'équation dont la manipulation en **Annexe E** permet d'aboutir aux expressions de C_1 et C_2 suivantes

$$\begin{cases} C_1 = -\frac{1 + \alpha_2 \cdot L}{\alpha_2} C_2, \\ C_2 = \frac{2/\delta + \alpha_1}{1 + \alpha_1(1/\alpha_2 + L)} C_3, \\ C_3 = -\frac{q_0 \cdot \delta^2}{4}. \end{cases} \quad (45)$$

En remplaçant les expressions des coefficients constants de (45) dans (44), on obtient l'expression $v(z)$ spécifique au modèle du fantôme d'épaisseur finie L

$$v(z) = -\frac{q_0 \cdot \delta^2}{4} \left[\left(z - \frac{1 + \alpha_2 \cdot L}{\alpha_2} \right) \cdot \frac{2/\delta + \alpha_1}{1 + \alpha_1(1/\alpha_2 + L)} + e^{-2 \cdot z/\delta} \right]. \quad (46)$$

5.2. Solution en régime stationnaire sans terme source

L'équation de transfert de chaleur en régime transitoire homogène pour le fantôme d'épaisseur finie est

$$\frac{\rho \cdot c}{k} \frac{\partial w(z, t)}{\partial t} = \frac{\partial^2 w(z, t)}{\partial z^2}, \quad (47)$$

où $w(z, t)$ est la solution en régime transitoire ($^{\circ}\text{C}$). La condition initiale de cette équation doit respecter la somme (38)

$$T(z, 0) = v(z) + w(z, 0) = 0, \quad \forall z, \quad (48)$$

soit

$$w(z, 0) = -v(z), \quad \forall z. \quad (49)$$

En revanche, comme pour l'équation en régime établi, les conditions limites de (47) sont équivalentes à celles de (30), c'est-à-dire

$$\frac{\partial w(0, t)}{\partial z} = \alpha_1 \cdot w(0, t), \quad (50)$$

et

$$\frac{\partial w(L, t)}{\partial z} = -\alpha_2 \cdot w(L, t). \quad (51)$$

Pour résoudre l'équation (47), une méthode de séparation de variables a été utilisée, dont la décomposition en une fonction spatiale $Z(z)$ et temporelle $\Gamma(t)$ suivante

$$w(z, t) = Z(z) \cdot \Gamma(t), \quad (52)$$

conduit à la réécriture de (47) et sa réorganisation

$$\frac{\rho \cdot c_p}{k} \frac{\Gamma'(t)}{\Gamma(t)} = -\lambda^2 = \frac{Z''(z)}{Z(z)}, \quad (53)$$

où λ est une des n valeurs propres solution de (53). L'ensemble des n valeurs propres est déterminé à partir de l'équation suivante

$$\cot(\lambda_n L) = \frac{\lambda_n^2 + \alpha_1 \cdot \alpha_2}{\lambda_n(\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (54)$$

Les solutions unitaires de $\Gamma(t)$ et $Z(z)$ sont exprimées analytiquement (**Annexe F**) sous les formes suivantes

$$\Gamma_n(t) = C_n \cdot e^{-\lambda_n^2 \frac{k}{\rho \cdot c} t}, \quad (55)$$

et

$$Z_n(z) = \lambda_n \cdot \cos(\lambda_n \cdot z) + \alpha_1 \cdot \sin(\lambda_n \cdot z), \quad (56)$$

avec C_n égale à

$$C_n = \frac{1}{N} \int_0^L Z_n(z) \cdot w_n(z, 0) dz, \quad (57)$$

et N est la norme

$$N = \int_0^L |Z_n(z)|^2 dz. \quad (58)$$

La solution de $w(z,t)$ s'exprime donc comme la somme des n produits des solutions de $\Gamma(t)$ et $Z(z)$

$$w(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} Z_n(z) \cdot \Gamma_n(t), \quad (59)$$

qui donne, après substitution des expressions (55) et (56) dans (59), l'expression $w(z,t)$ finale :

$$w(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} C_n (\lambda_n \cdot \cos(\lambda_n \cdot z) + \alpha_1 \cdot \sin(\lambda_n \cdot z)) e^{-\lambda_n^2 \frac{k}{\rho \cdot c} t}. \quad (60)$$

6. Etude du comportement de la solution analytique $T(z,t)$

6.1. Convergence et précision de $T(z,t)$

Il est nécessaire d'estimer le nombre n de valeurs propres λ suffisant pour calculer avec précision le comportement analytique de l'élévation de température du fantôme équivalent d'épaisseur finie dans l'espace et le temps avec la solution $T(z,t)$.

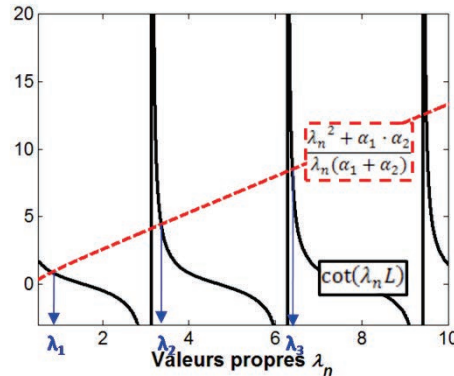


Figure IV.19 - Tracés relatifs à l'équation (54) permettant de déterminer le nombre minimal n de valeurs propres pour la solution $T(z,t)$ lorsque $\alpha_i = 25 \text{ m}^{-1}$ et $L = 15 \text{ mm}$.

En observant l'équation (54), on constate que les valeurs propres dépendent des valeurs des coefficients d'échanges aux interfaces air/fantôme α_i et de l'épaisseur du fantôme L . Pour déterminer les valeurs propres λ_n il suffit de tracer sur un même graphique (Figure IV.19), les courbes relatives à chaque membre de l'équation (54).

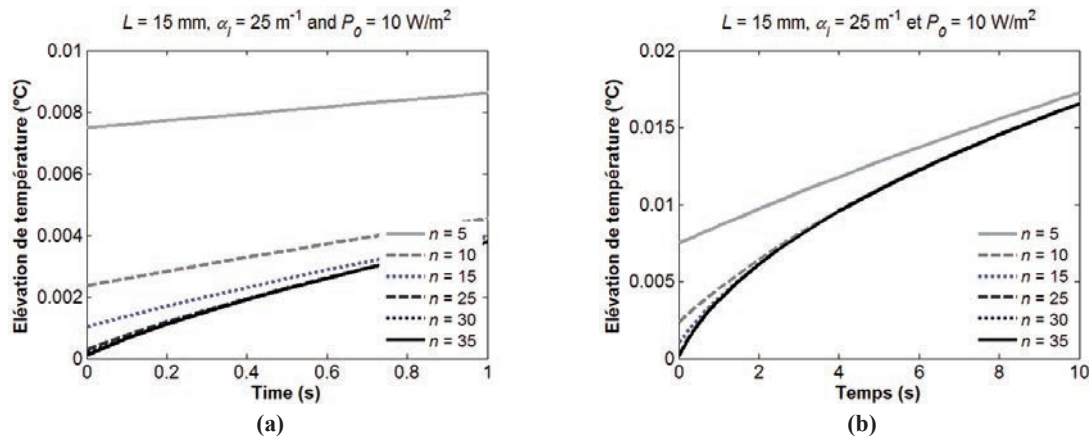


Figure IV.20 - Convergence vers $T(z,0) = 0$ des dynamiques d'élévations de températures calculées pour différentes valeurs de n pour (a) 1 sec et (b) 10 sec d'exposition lorsque $\alpha_i = 25 \text{ m}^{-1}$, $L = 15 \text{ mm}$ et $P_0 = 10 \text{ mW}$.

Il est supposé dans cette étude paramétrique que les valeurs de α_i sont comprises entre 20 m^{-1} et 30 m^{-1} , et que l'épaisseur du fantôme L est comprise entre 5 et 15 mm. Le nombre de valeurs propres est considéré suffisant pour la précision de la solution lorsque la dynamique de température respecte la condition initiale (33), c'est-à-dire que $T(z,t)$ converge vers 0 lorsque $t = 0 \text{ sec}$. Pour déterminer le nombre n de valeurs propres suffisant, on compare les dynamiques d'élévation de température obtenues analytiquement avec la solution $T(z,t)$ pour plusieurs valeurs

de n sur des temps d'exposition de 1 sec et 10 sec (Figure IV.20), afin de mettre en évidence la valeur de n à partir de laquelle la convergence est acceptable, c'est-à-dire que le critère $T(z, 0) < 0.0005$ est respecté. Dans le cas d'un fantôme d'épaisseur L égale à 15 mm exposé à une densité de puissance incidente $P_0 = 10 \text{ W/m}^2$, avec des conditions d'échanges à ses interfaces régies par un coefficient α_i égale à 25 m^{-1} , le nombre n de valeurs propres doit être au moins égal à 25 afin d'assurer le critère de convergence fixé.

En regardant le Tableau IV.4, qui donne le nombre n de valeurs propres nécessaire au calcul de $T(z, t)$ en fonction de l'épaisseur L et du coefficient aux interfaces α_i , on note que la valeur de n augmente avec l'épaisseur. En effet, lorsque L est égal à 5 mm il suffit d'un nombre n égal ou supérieur à 10 pour atteindre le critère de convergence fixé, en revanche lorsque L atteint 15 mm, il faut au minimum que n soit égal 25 pour respecter de critère de convergence. On remarque aussi que les valeurs du coefficient α_i considérées n'ont pas d'effet marqué sur le nombre de valeurs propres, puisque n reste constant pour un L donné quel que soit α_i .

Tableau IV.4 - Valeurs de n minimales en fonction des valeurs de l'épaisseur L du fantôme et des coefficients α_i aux interfaces.

L (mm)	<i>Coefficient α_i (m^{-1})</i>		
	20	25	30
5	10	10	10
10	15	15	15
15	25	25	25

6.2. Analyse paramétrique de $T(z, t)$

Dans cette sous-section les effets des variations de plusieurs paramètres du modèle thermique du fantôme (L , α_i et P_0) sur la dynamique d'élévation de température sur 1 h, ainsi que sur la distribution de température après 500 sec sont comparés et analysés pour s'assurer que le comportement traduit par (38) soit logique et conforme à celui attendu. C'est-à-dire 1) que les résultats de $T(z, t)$ convergent vers les résultats calculés avec le modèle semi-infini [4] lorsque L augmente ; 2) que l'amplitude des valeurs de $T(z, t)$ diminue lorsque les transferts de chaleur du fantôme vers l'air augmentent, c'est-à-dire que α_i augmente ; et 3) que les rapports entre les valeurs de $T(z, t)$ sont proches de ceux entre les valeurs de densité de puissance incidente P_0 quand celle-ci varie.

6.2.1. Impact de l'épaisseur du fantôme L

Les dynamiques d'élévation de température calculées avec la solution $T(z, t)$ à la surface $z = 0$ mm des fantômes d'épaisseur L égale à 5 mm, 10 mm ou bien 15 mm sont données en Figure IV.21a. Les distributions d'élévation de température calculées suivant z sont données en Figure IV.21b après une durée d'exposition de 500 sec. Dans les deux cas, les résultats obtenus avec la solution de l'équation de transfert de chaleur spécifique pour le fantôme d'épaisseur finie sont comparés aux résultats analytiques obtenus avec la solution du modèle de tissu semi-infini présentée dans [4].

L'analyse des résultats en Figure IV.21 met en évidence deux phénomènes. Le premier est que pour des durées d'exposition inférieures à 1 h, l'élévation de température est plus rapide pour les fantômes fins. Ce phénomène s'explique par la différence de conductivité thermique entre le fantôme et l'air au niveau de l'interface $z = L$. La diffusion de la chaleur à travers $z = L$ est

différente de celle au sein du fantôme, en raison de la faible conductivité thermique de l'air ($0,027 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$ à 20 °C [11]) en comparaison à celle du fantôme équivalent ($0,386 \text{ W/(m}\cdot\text{°C)}$), engendrant des augmentations de l'élévation de température à proximité de l'interface (Figure IV.21b).

Le second phénomène est la convergence des résultats pour le modèle du fantôme d'épaisseur finie vers ceux du modèle semi-infini lorsque la valeur de L augmente. En effet, pour des durées d'exposition très courtes, c'est-à-dire inférieures à environ 1 min, le modèle d'épaisseur finie proposé et le modèle semi-infini établi par Foster *et al.* donnent des résultats équivalents. En revanche, ce n'est pas le cas pour les durées d'exposition supérieures à 1 min. Après 500 sec d'exposition, les différences entre modèles fini et semi-infini peuvent atteindre jusqu'à + 46 % pour $L = 5 \text{ mm}$ en $z = 0 \text{ mm}$. Pour les autres épaisseurs du fantôme, les différences sont plus faibles, elles sont de + 10 % pour le fantôme $L = 10 \text{ mm}$, et de + 4 % pour le fantôme $L = 15 \text{ mm}$.

Les résultats présentés montrent donc que, pour les expositions de courtes durées (typiquement inférieur à 1 min), le comportement thermique du fantôme peut aussi bien être décrit par la solution analytique spécifique au modèle semi-infini que par celle du modèle d'épaisseur finie proposé. En revanche, pour des durées d'exposition plus longues (supérieures à 1 min), la différence de conductivité thermique entre le fantôme et l'air au niveau de l'interface $z = L$ entraîne une augmentation de la dynamique d'élévation de température sur la surface $z = 0$, imposant l'utilisation du modèle à épaisseur fini plutôt que le modèle semi-infini pour garantir une meilleure précision de l'estimation de l'échauffement induit par la puissance électromagnétique absorbée dans le fantôme.

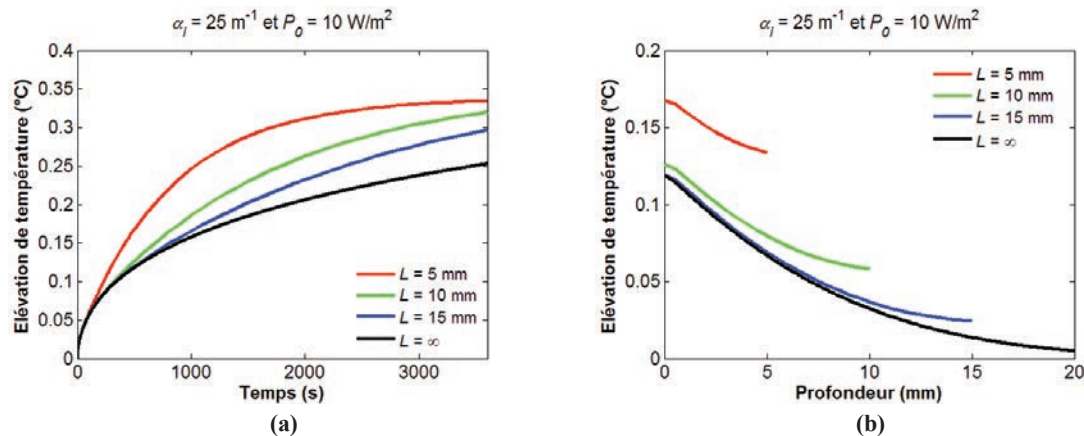


Figure IV.21 - Impact des variations d'épaisseur du fantôme L sur (a) la dynamique de l'élévation de température à la surface du fantôme $z = 0 \text{ mm}$ sur une durée d'exposition de 1 h et sur (b) la distribution de température dans l'épaisseur du fantôme après 500 sec d'exposition.

6.2.2. Impact du coefficient d'échange thermique α_i

Les effets des variations du coefficient α_i sur la dynamique d'élévation de température durant 1 h d'exposition et sur la distribution de température dans l'épaisseur du fantôme $L = 15 \text{ mm}$ après 500 sec d'exposition sont présentés en Figure IV.22.

La Figure IV.22a permet d'observer que les effets des variations de α_i sur les températures calculées à la surface $z = 0$ sont progressifs. Pour les durées d'exposition très courtes, inférieures à la minute, l'impact des variations de la valeur α_i est peu perceptible (écarts entre les courbes inférieurs à 1 %). En revanche, au delà, la dynamique de température est réduite par l'augmentation de la valeur de α_i . En effet, après 500 sec d'exposition la valeur d'élévation de

température en $z = 0$ mm est réduite de - 3,3 % lorsque la valeur passe de 25 m^{-1} à 30 m^{-1} et de - 6,4 % lorsque c'est de 20 m^{-1} à 30 m^{-1} . Après 1 h d'exposition, les températures diminuent de - 9,5 % et - 18,7 % lorsque α_i passe respectivement de 25 m^{-1} à 30 m^{-1} et 20 m^{-1} à 30 m^{-1} . Le comportement selon la profondeur du fantôme (Figure IV.22b) est semblable à celui en surface puisque qu'en $z = L$, après 500 sec d'exposition, les écarts de températures sont de + 4,2 % et + 8,6 % pour passer respectivement de 25 m^{-1} à 30 m^{-1} et de 20 m^{-1} à 30 m^{-1} .

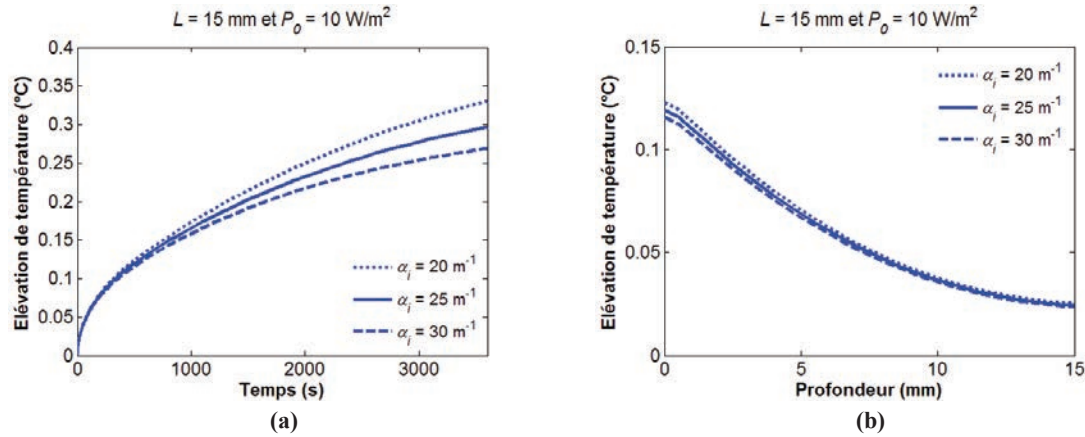


Figure IV.22 - Impact des variations du coefficient aux interfaces α_i sur (a) la dynamique de l'élévation de température à la surface du fantôme $z = 0$ mm sur une durée d'exposition de 1 h et sur (b) la distribution de température dans l'épaisseur du fantôme après 500 sec d'exposition.

6.2.3. Impact de la densité de puissance incidente P_0

Les comportements de la dynamique d'élévation de température à la surface $z = 0$ mm du fantôme équivalent et la distribution suivant l'épaisseur $L = 15$ mm sont analysés pour plusieurs valeurs de densité de puissance incidente P_0 en Figure IV.23.

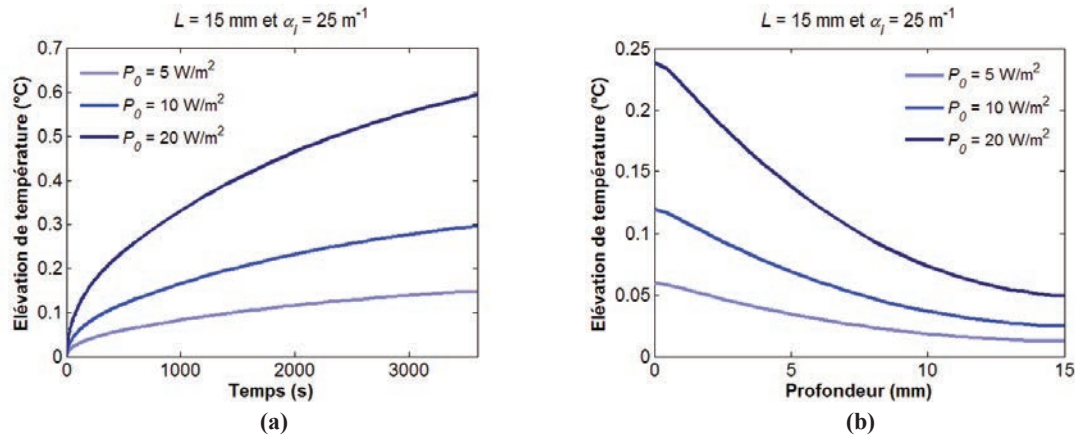


Figure IV.23 - Impact des variations de la puissance incidente P_0 sur (a) la dynamique de l'élévation de température à la surface du fantôme $z = 0$ mm sur une période d'exposition de 1 h et sur (b) la distribution de température dans l'épaisseur du fantôme après 500 sec d'exposition.

Comme attendu, la dynamique de température est d'autant plus importante que la valeur P_0 augmente et cela dès le début de l'exposition (Figure IV.23a) ; de plus les rapports entre les courbes restent constants quel que soit l'instant d'exposition et sont équivalents à ceux entre les valeurs P_0 . En effet, après 1 min d'exposition on relève un rapport entre les courbes d'élévation de température compris entre 2 et 4 comme entre les valeurs de densité de puissance P_0 . Les rapports sont également identiques aux instants d'exposition 500 sec et 3600 sec. De plus, avec la Figure IV.23b on observe que les rapports entre les courbes dans la profondeur du fantôme sont égaux à

ceux à la surface $z = 0$ mm. Le modèle analytique, est un modèle simplifié car le coefficient α ne prend pas en compte les variations des pertes thermiques par rayonnement thermique liées à l'élévation de température du fantôme (eq. (37)), ces pertes sont considérées constantes au cours de l'exposition, expliquant la proportionnalité entre les résultats pour différentes valeurs de P_0 .

7. Conclusion

Un modèle thermique analytique 1D du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz et d'épaisseur finie est proposé dans ce chapitre. Il permet d'évaluer l'élévation de la température générée par l'absorption d'énergie électromagnétique.

Jusqu'à présent, plusieurs modèles analytiques ont été développés pour estimer l'échauffement du corps humain induit par une exposition à un champ électromagnétique. Il existe plusieurs modèles analytiques, soit homogènes ou bien multicouches. Même si l'intérêt du modèle multicouche a été démontré pour les études thermiques en bande millimétrique, le fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz est homogène, et il n'existe pas à notre connaissance de fantôme multicouche à 60 GHz qui soit à la fois l'équivalent électromagnétique et thermique des tissus humains.

Afin de mettre en évidence les différents mécanismes de transfert de chaleur qui se produisent dans le fantôme et à ses interfaces, les différents modes de transfert de chaleur et conditions limites aux interfaces d'un matériau solide ont été étudiées. Les caractéristiques thermiques à 20 °C du fantôme équivalent de la peau à 60 GHz ont été mesurées (conductivité thermique k , et capacité thermique c). Les résultats de mesure ont été comparés aux valeurs moyennes de la peau, révélant de faibles écarts.

Les différents mécanismes de transfert de chaleurs spécifiques à un fantôme d'épaisseur finie L exposé à une onde plane, sont pris en compte par l'équation de transfert de chaleur 1D et à travers les conditions limites aux interfaces qui considèrent les dissipations de chaleur par convection et rayonnement. L'équation 1D de transfert de chaleur a été résolue via une méthode de résolution classique aux équations différentielles du second ordre pour permettre l'étude analytique du comportement thermique du fantôme. Cela a permis de déterminer l'expression analytique de l'élévation de la température dans le temps et l'espace. Le comportement de cette solution a été comparé et analysé pour différentes épaisseurs de fantôme, mettant en avant que l'utilisation du modèle thermique d'épaisseur fini permet d'évaluer précisément l'échauffement induit par des expositions excédant 1 min, contrairement au modèle de tissu d'épaisseur semi-infinie. L'impact des coefficients aux interfaces ainsi que la valeur de la densité de puissance incidente sur le comportement thermique du fantôme ont aussi été analysés, révélant des comportements attendus, comme une diminution de l'élévation de température lorsque la valeur du coefficient d'échange augmente ou bien des rapports entre les variations d'élévation de température proportionnels à ceux entre les valeurs de densités de puissance incidente.

Cependant, pour valider le modèle thermique 1D du fantôme équivalent proposé, les résultats obtenus analytiquement avec la solution analytique doivent être comparés à ceux d'un modèle numérique, et le comportement d'échauffement en surface du fantôme doit être vérifié ensuite expérimentalement. Ceci fait l'objet du chapitre suivant.

8. Références

- [1] M. Zhadobov, N. Chahat, R. Sauleau, C. Le Quement, and Y. Le Drian, “Millimeter-wave interactions with the human body: state of knowledge and recent advances,” *Int. J. Microw. Wirel. Technol.*, vol. 3, no. 02, pp. 237–247, Apr. 2011.
- [2] H. H. Pennes, “Analysis of tissue and arterial blood temperatures in the resting human forearm,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 85, no. 1, pp. 5–34, 1998.
- [3] E. H. Wissler, “Pennes’ 1948 paper revisited,” *J. Appl. Physiol.*, vol. 85, no. 1, pp. 35–41, 1998.
- [4] K. R. Foster, H. N. Kritikos, and H. P. Schwan, “Effect of surface cooling and blood flow on the microwave heating of tissue,” *Biomed. Eng. IEEE Trans. On*, no. 3, pp. 313–316, 1978.
- [5] S. I. Alekseev and M. C. Ziskin, “Influence of blood flow and millimeter wave exposure on skin temperature in different thermal models,” *Bioelectromagnetics*, vol. 30, no. 1, pp. 52–58, Jan. 2009.
- [6] A. Kanezaki, A. Hirata, S. Watanabe, and H. Shirai, “Parameter variation effects on temperature elevation in a steady-state, one-dimensional thermal model for millimeter wave exposure of one- and three-layer human tissue,” *Phys. Med. Biol.*, vol. 55, no. 16, pp. 4647–4659, Aug. 2010.
- [7] S. I. Alekseev, A. A. Radziewsky, I. Szabo, and M. C. Ziskin, “Local heating of human skin by millimeter waves: Effect of blood flow,” *Bioelectromagnetics*, vol. 26, no. 6, pp. 489–501, Sep. 2005.
- [8] L. Zilberti, A. Arduino, O. Bottauscio, and M. Chiampi, “Parametric analysis of transient skin heating induced by terahertz radiation: Skin Heating by THz Radiation,” *Bioelectromagnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 314–323, Jul. 2014.
- [9] N. Chahat, M. Zhadobov, and R. Sauleau, “Broadband Tissue-Equivalent Phantom for BAN Applications at Millimeter Waves,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 7, pp. 2259–2266, Jul. 2012.
- [10] S. I. Alekseev and M. C. Ziskin, “Local heating of human skin by millimeter waves: A kinetics study,” *Bioelectromagnetics*, vol. 24, no. 8, pp. 571–581, Dec. 2003.
- [11] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergma, and A. Lavine, *Principles of Heat and Mass Transfers*, 7th ed. Singapore: John Wiley & Sons, 2013.
- [12] “Emissivity Values for Common Materials ‘<http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>.’”
- [13] Y. A. Cengel, *Heat Transfer, A Practical Approach*, 2nd ed. 2002.
- [14] K. Ito, K. Furuya, Y. Okano, and L. Hamada, “Development and Characteristics of a Biological Tissue-Equivalent Phantom for Microwaves,” *Electron. Commun. Jpn.*, vol. 84, no. 4, pp. 67–77, Apr. 2001.
- [15] G. W. H. Höhne, W. F. Hemminger, and H.-J. Flammersheim, *Differential Scanning Calorimetry*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003.
- [16] P. A. Hasgall, F. Di Gennaro, C. Baumgartner, E. Neufeld, M. C. Gosselin, D. Payne, A. Klingeböck, and N. Kuster, “Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues,” 2.5, 2014.
- [17] H. Czichos, T. Saito, and L. R. Smith, *Handbook of Material Measurement Methods*. Springer, 2006.

- [18] Y. Kurazumi, T. Tsuschikawa, J. Ishii, K. Fukagawa, Y. Yamato, and N. Matsubara, "Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 12, pp. 2142–2153, Dec. 2008.
- [19] D. Fiala, K. J. Lomas, and M. Stohrer, "A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system," *J. Appl. Physiol.*, vol. 87, no. 5, pp. 1957–1972, 1999.
- [19] "Keysight Technologies, 85070E Dielectric Probe Kit," <http://www.keysight.com/en/pd-304506-pn-85070E/dielectric-probe-kit?cc=FR&lc=fr>
- [20] J. Wall, <http://www.ewp.rpi.edu/hartford/~wallj2/CHT/Notes/ch05.pdf>

Chapitre V. Validation numérique et expérimentale du modèle thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz

Sommaire

1.	Introduction	159
2.	Modèle numérique thermique du fantôme à épaisseur finie.....	160
2.1.	Description du modèle numérique.....	160
2.2.	Equivalences entre les paramètres numériques et analytiques	161
2.3.	Comparaison avec le modèle thermique analytique du fantôme	163
3.	Validation expérimentale.....	166
3.1.	Matériel et protocole de mesure par thermométrie infrarouge	166
3.2.	Analyse numérique des incertitudes des paramètres du modèle expérimental.....	167
3.3.	Validation expérimentale du comportement thermique du fantôme	175
4.	Comparaison au modèle numérique multicouche de tissus	178
4.1.	Structure et particularités du modèle de tissus multicouches	178
4.2.	Modèle numérique multicouche du corps humain exposé	179
4.3.	Ecart avec le modèle homogène du fantôme de la peau humaine	180
5.	Conclusion.....	185
6.	Références	186

1. Introduction

Dans le chapitre IV, un modèle thermique 1D du fantôme équivalent de la peau humaine a été proposé. Ce modèle décrit analytiquement l'échauffement généré dans un fantôme homogène d'épaisseur finie au cours d'une exposition à une onde plane à 60 GHz en incidence normale. Le comportement analytique thermique du fantôme a été analysé en fonction des variations de plusieurs paramètres du modèle tels que l'épaisseur du fantôme, le coefficient d'échanges thermiques aux interfaces avec l'air ou encore la densité de puissance incidente de l'onde plane. L'analyse a mis en avant l'intérêt du modèle thermique d'un fantôme d'épaisseur finie pour évaluer l'élévation de température lorsque les durées d'exposition excèdent 1 min.

L'objectif du présent chapitre est de valider numériquement et expérimentalement le comportement thermique du fantôme décrit analytiquement en chapitre IV. Pour cela, les résultats analytiques d'élévation de température calculés avec la solution de l'équation de transfert de chaleur du fantôme d'épaisseur finie sont comparés à ceux obtenus avec un modèle numérique équivalent, le comportement thermique du fantôme étant étudié expérimentalement pour une exposition à 60 GHz avec un guide d'onde ouvert. De plus, pour montrer la pertinence des mesures thermiques sur le fantôme homogène pour les études dosimétriques thermiques, une étude comparative numérique avec un modèle du corps humain multicouches est présentée.

Dans la section 2, un modèle thermique numérique, équivalent au modèle analytique du fantôme d'épaisseur finie, est proposé. Les spécificités de ce modèle numérique sont données et expliquées dans la sous-section 2.1. Les équivalences entre les paramètres analytiques et numériques sont données dans la sous-section 2.2. En sous-section 2.3, les élévations de température obtenues après simulations numériques sont comparées aux résultats analytiques obtenus avec la solution de l'équation de transfert de chaleur et déjà présentés dans le chapitre IV. Dans la section 3, les résultats de l'étude expérimentale sont analysés. Le dispositif ainsi que le protocole de mesure mis en place sont décrits en sous-section 3.1, suivis en sous-section 3.2, d'une analyse paramétrique numérique des effets que peuvent avoir les incertitudes de certains paramètres liés au dispositif expérimental ou bien aux propriétés diélectriques ou thermo-physiques du fantôme sur les mesures d'élévation de température. Les résultats des mesures effectuées sur plusieurs fantômes d'épaisseurs différentes sont analysés et comparés en sous-section 3.3. Dans la dernière section, le comportement thermique du fantôme homogène de la peau d'épaisseur finie est comparé à celui d'un modèle de tissus multicouches. Après une présentation du modèle de tissus multicouches dans la sous-section 4.1, son comportement thermique et ces spécificités sont ensuite comparés à ceux du fantôme dans les sous-sections suivantes afin d'évaluer et de quantifier l'impact sur le comportement thermique du modèle de tissus multicouches des variations de paramètres thermo-physiques, d'épaisseur de couches et de flux sanguin.

2. Modèle numérique thermique du fantôme à épaisseur finie

2.1. Description du modèle numérique

L'exposition du fantôme à une onde plane en incidence normale est modélisée avec le solveur temporel du module CST Microwave StudioTM qui permet de calculer en 3D les distributions de champs électromagnétiques et de DAS dans le modèle. Ces distributions sont ensuite utilisées dans le module CST Multiphysics StudioTM comme source de chaleur, permettant d'évaluer l'évolution de la température au cours d'une l'exposition. Ce module dispose de deux solveurs, le premier permet de calculer la dynamique de température dans le fantôme, et le second fournit la distribution de température dans le fantôme en régime établi.

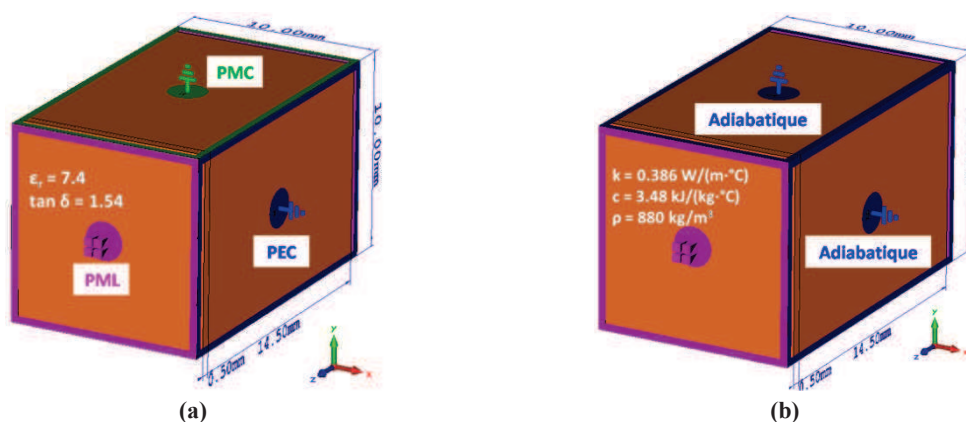


Figure V.1 - Descriptifs des modèles numérique (a) électromagnétique et (b) thermique simulés sous CST MWS et CST MPS.

2.1.1. Forme, dimensions et propriétés du fantôme équivalent

Dans le modèle numérique le fantôme équivalent de la peau humaine d'épaisseur finie L est un parallélépipède à base carrée de côté 10 mm, dont les propriétés diélectriques sont extraites de [1] et les propriétés thermiques sont obtenues à la suite de la caractérisation expérimentale du fantôme présentée en chapitre IV (Tableau V.1).

Tableau V.1 - Propriétés diélectriques à 60 GHz [1] et thermo-physiques du fantôme à 20 °C.

Propriétés diélectriques à 60 GHz		Propriétés thermo-physiques à 20 °C		
ϵ_r	$\tan \delta$	k (W/(m·°C))	c (kJ/(kg·°C))	ρ [1] (kg/m³)
7,4	1,54	0,386	3,48	880

2.1.2. Caractéristiques de l'onde plane

Sous CST MWS, la surface $z = 0$ mm du fantôme est exposée à une onde plane 60 GHz en incidence normale définie par un vecteur champ électrique d'amplitude E et elle se propage suivant $-z$ avec une polarisation linéaire.

2.1.3. Conditions limites aux frontières de la structure

Pour les calculs numériques, les choix des conditions limites électromagnétiques et thermiques permettent de définir le fantôme comme infini suivant les directions x et y . Dans le modèle électromagnétique, des conditions limites de type conducteur magnétique parfait (PMC), conducteur électrique parfait (PEC) ou bien absorbant parfait (PML) sont respectivement utilisées dans les directions x , y et z , afin d'assurer l'exposition du fantôme à une onde plane où les vecteurs de champ électrique E sont orientés uniquement suivant y et les vecteurs de champ magnétique uniquement suivant x . Dans le modèle thermique, des conditions adiabatiques sont imposées suivant x et y afin d'assurer une diffusion de la chaleur uniquement suivant z , où les conditions limites imposées permettent la traversée de la totalité du flux de chaleur.

2.1.4. Critère de maillage électromagnétique du modèle

La taille des mailles dans le modèle numérique est un critère essentiel pour la précision du calcul des distributions de DAS dans le fantôme exposé à l'onde plane à 60 GHz. A cette fréquence la profondeur de pénétration du rayonnement est faible, autour de 0,5 mm, et la longueur d'onde dans le fantôme λ_p est égale à 1,84 mm. Pour assurer une précision optimale des résultats numériques, mais aussi pour optimiser le temps de simulation, le maillage du fantôme dans la profondeur du fantôme varie. En effet, le maillage doit être plus fin sous la surface exposée du fantôme, entre $z = 0$ mm et $z = 0,5$ mm, afin de garantir une précision élevée pour le calcul des valeurs de DAS. Une étude de convergence a été menée afin de déterminer la taille de cellule maximale à ne pas dépasser entre 0 et 0,5 mm (Figure V.2), amenant à fixer un critère à $\lambda_p/50$, dont la déviation du résultat au critère de maillage $\lambda_p/100$ est seulement de -4 %. Entre $z = 0,5$ mm et $z = L$ le critère est de $\lambda_p/20$. Précisons que suivant x et y le maillage est identique et égal à $\lambda_p/20$ quelle que soit la profondeur z .

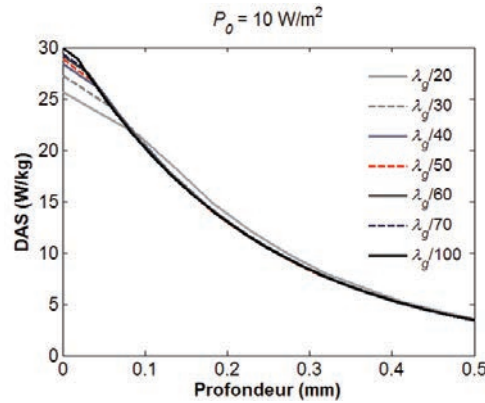


Figure V.2 - Etude de la convergence de la distribution de DAS dans l'épaisseur du fantôme pour différents critères de maillage suivant l'axe z entre 0 et 0,5 mm.

2.2. Equivalences entre les paramètres numériques et analytiques

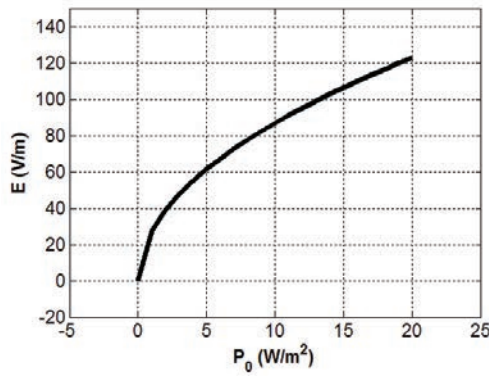
2.2.1. Source d'exposition

Dans le modèle analytique, on utilise directement la valeur de la densité de puissance incidente P_0 de l'onde plane pour le calcul de $T(z,t)$. La densité de puissance P_0 peut être reliée analytiquement à l'amplitude du vecteur de champ électrique E crête par l'expression suivante :

$$P_0 = \frac{|E|^2}{2\sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}} \quad (1)$$

où P_0 s'exprime en W/m^2 , et E en V/m , μ_0 et ε_0 sont respectivement la perméabilité et la permittivité du vide. L'expression (1) est aussi valable dans l'air en raison de ses valeurs de perméabilité et permittivité relatives proches de 1. Cette expression nous permet de calculer la valeur à utiliser pour que la définition de l'onde plane dans le modèle numérique CST MWS soit identique à celle du modèle analytique.

La Figure V.3a présente l'évolution de l'amplitude du vecteur E en fonction des variations des valeurs de densité de puissance incidente P_0 ; la table en Figure V.3b donne les valeurs de E équivalentes aux valeurs de densité de puissance utilisées dans le chapitre IV.



(a)

P_0 (W/m ²)	E (V/m)
5	61,4
10	86,8
20	122,8

(b)

Figure V.3 - Rapport entre la densité de puissance incidente P_0 et l'amplitude du vecteur de champ électrique E définissant l'exposition du fantôme à une onde plane. (a) Courbe $E=f(P_0)$ et (b) table des équivalences entre le paramètre analytique et numérique.

2.2.2. Transferts de chaleur aux interfaces air/fantôme

Dans le modèle thermique analytique du fantôme, la dissipation de chaleur du fantôme vers l'air dépend du coefficient α . Dans le modèle numérique équivalent, les échanges thermiques aux interfaces air/fantôme sont contrôlés par les valeurs du coefficient de transfert par convection h_c , par l'émissivité e de la surface d'échange ainsi que par la température définie pour l'environnement, autrement dit la température de l'air T_{air} . Cela permet au solveur thermique de calculer les quantités de chaleur q_c et q_r (W/m^2), perdues respectivement par convection et rayonnement thermique, via ces expressions analytiques

$$q_{conv} = h_c \cdot A(T_{fantôme}(0,t) - T_{air}) \quad (2)$$

et

$$q_{rad} = e \cdot \sigma \cdot A(T_{fantôme}^4(0,t) - T_{air}^4) \quad (3)$$

où A est la surface du fantôme en contact avec l'air (m^2), σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 \cdot K^4)$), et $T_{fantôme}(0,t)$ est la température en surface du fantôme.

Il est possible de relier le coefficient analytique α aux paramètres numériques h_c , e et T_{air} en utilisant le rapport suivant

$$\alpha = \frac{h}{k}, \quad (4)$$

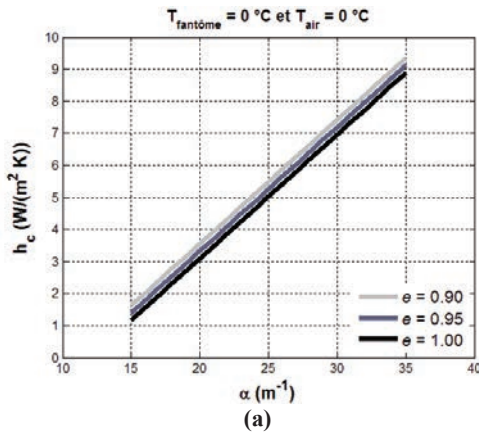
où h est le coefficient de transfert de chaleur aux interfaces air/fantôme (m^{-1}) et k est la conductivité thermique du fantôme ($\text{W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$). Dans le cas du fantôme le coefficient h peut être vu comme la somme suivante

$$h = h_c + h_r, \quad (5)$$

avec h_c le coefficient de transfert thermique par convection et h_r le coefficient de transfert thermique par rayonnement. Ce dernier peut être calculé avec l'expression suivante

$$h_r = e \cdot \sigma (T_{\text{fantôme}}^2(0, t) + T_{\text{air}}^2) (T_{\text{fantôme}}(0, t) + T_{\text{air}}). \quad (6)$$

Attention, dans cette formule les températures utilisées doivent être exprimées en degrés Kelvin.



α (m^{-1})	$T_{\text{fantôme}} - T_{\text{air}}$ ($^\circ\text{C}$)	e		
		0.9	0.95	1
20	0	3,56	3,33	3,10
	1	3,54	3,31	3,07
25	0	5,49	5,25	5,03
	1	5,47	5,24	5,02
30	0	7,42	7,19	6,96
	1	7,40	7,17	6,93

(b)

Figure V.4 - Rapports entre le coefficient analytique α_i et le coefficient de transfert de chaleur du fantôme vers l'air h_c pour plusieurs valeurs d'émissivité e . (a) Abaque pour $T_{\text{fantôme}} = 0^\circ\text{C}$, $T_{\text{air}} = 0^\circ\text{C}$ et (b) table des équivalences donnant les valeurs de h_c .

A partir des formules présentées dans cette sous-section, il est possible d'établir un abaque des correspondances entre le paramètre analytique α et les paramètres numériques pour des températures données de $T_{\text{fantôme}}(0, t)$ et de T_{air} (Figure V.4). Pour des variations de $T_{\text{fantôme}}(0, t) - T_{\text{air}}$ comprises entre 0 et 1°C , les déviations entre les valeurs h_c sont inférieures à 1 % pour des valeurs de e comprises entre 0,9 et 1, et des valeurs de α comprises elles entre 20 et 30 m^{-1} (Figure V.4).

2.3. Comparaison avec le modèle thermique analytique du fantôme

Dans cette sous-section, les élévations de température calculées avec le logiciel CST pour un modèle thermique numérique du fantôme équivalent sont comparées à celles calculées analytiquement pour plusieurs épaisseurs L (5 mm, 10 mm et 15 mm), ainsi que pour plusieurs valeurs de α_i (20 m^{-1} , 25 m^{-1} et 30 m^{-1}) et plusieurs niveaux d'exposition P_0 ($5 \text{ W}/\text{m}^2$, $10 \text{ W}/\text{m}^2$ et $20 \text{ W}/\text{m}^2$). Les équivalences entre les deux derniers paramètres analytiques et les paramètres du modèle numérique sont établies et données dans la sous-section 2.2. Les comparaisons qui suivent ont pour objectif de confirmer numériquement le comportement de la solution analytique et des amplitudes des élévations de température calculées.

L'analyse des résultats d'élévation de température en Figure V.5, Figure V.6 et Figure V.7 révèle un très bon accord entre les résultats obtenus avec le modèle numérique et ceux obtenus avec le modèle analytique. Les courbes d'élévation de température analytiques et numériques montrent une superposition quasiment parfaite que ce soit en termes de dynamique durant des durées d'exposition de 1 h (Figure V.5a, Figure V.6a et Figure V.7a) ou bien en terme de

distribution selon l'épaisseur du fantôme après 500 sec d'exposition (Figure V.5b, Figure V.6b et Figure V.7b). En effet, les écarts relevés en Figure V.5a sont inférieurs à 1,6 % en $z = 0$ mm après 500 sec d'exposition et à 3 % après 1 h et cela quelle que soit l'épaisseur L . En Figure V.6a, on constate aussi que, quelle que soit la valeur de α_i , les écarts entre les courbes analytiques et numériques ne dépassent pas 1,7 % après 500 sec ou bien 3,3 % à 1 h d'exposition. C'est une observation similaire qui est faite quelle que soit la valeur de P_0 , avec respectivement 1,7 % et 3 % d'écart maximal en $z = 0$ après 500 sec ou bien 1 h d'exposition (Figure V.7a).

Les résultats obtenus pour le modèle thermique numérique du fantôme équivalent de la peau à 60 GHz confirment donc le comportement thermique du modèle analytique établi dans le chapitre IV.

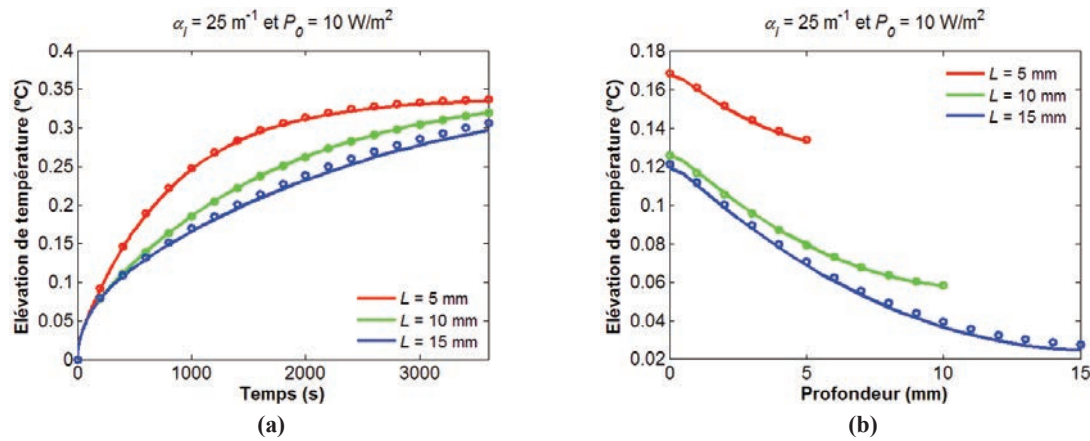


Figure V.5 - Impacts des variations de l'épaisseur L sur les résultats numériques, et comparaison avec les élévations de température analytiques obtenues avec le modèle thermique du fantôme équivalent d'épaisseur finie (a) dans le temps à l'interface $z = 0$ mm et (b) suivant la profondeur z du fantôme après 500 sec d'exposition. (—) Résultats analytiques et (ooo) résultats numériques.

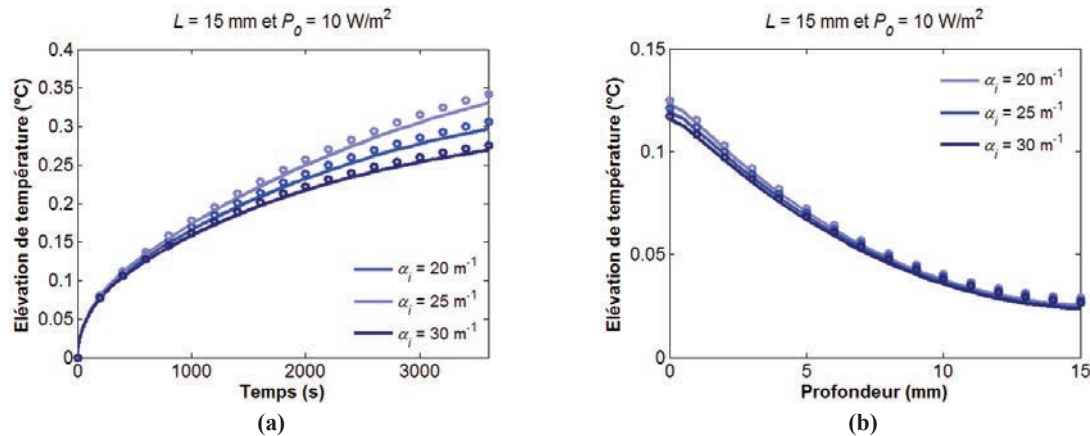


Figure V.6 - Impacts des variations du coefficient α_i sur les résultats numériques, et comparaison avec les élévations de température analytiques obtenues avec le modèle thermique du fantôme équivalent d'épaisseur finie (a) dans le temps à l'interface $z = 0$ mm et (b) suivant la profondeur z du fantôme après 500 sec d'exposition. (—) Résultats analytiques et (ooo) résultats numériques.

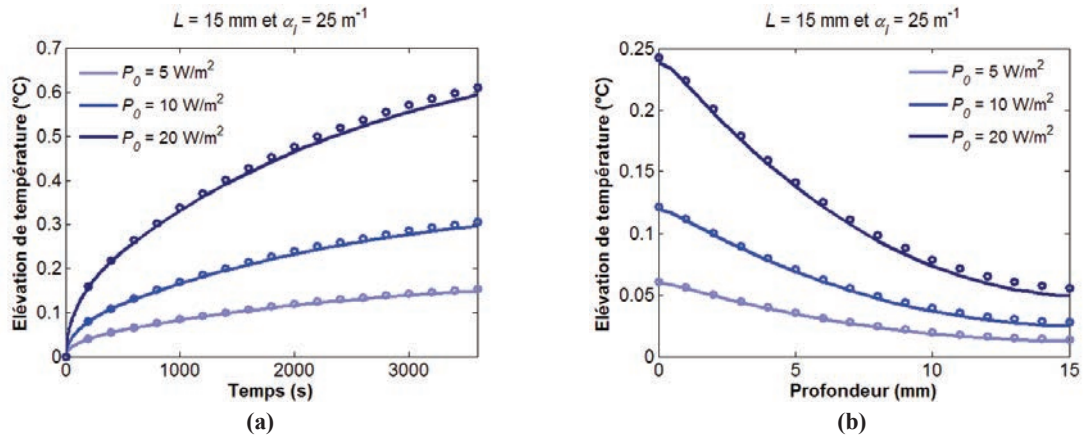


Figure V.7 - Impacts des variations de la densité de puissance incidente P_0 sur les résultats numériques, et comparaison avec les élévations de température analytiques obtenues avec le modèle thermique du fantôme équivalent d'épaisseur finie (a) dans le temps à l'interface $z = 0$ mm et (b) suivant la profondeur z du fantôme après 500 sec d'exposition. (—) Résultats analytiques et (o o o) résultats numériques.

3. Validation expérimentale

Les résultats présentés dans cette section visent à fournir une validation expérimentale du comportement thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à épaisseur finie.

3.1. Matériel et protocole de mesure par thermométrie infrarouge

3.1.1. Descriptif du dispositif de mesure

Le dispositif de mesure utilisé pour mesurer l'élévation de la température à la surface $z = 0$ mm du fantôme au cours d'une exposition à un guide d'onde ouvert est représenté schématiquement en Figure V.8a. Un fantôme de forme parallélépipédique ($100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times L$) est maintenu suspendu dans l'air par une grille de fil plastique de diamètre 0,2 mm tissé sur un support PVC évidé (Figure V.8b). Ce support permet d'assurer un coefficient d'échange α_i similaire aux interfaces air/fantôme en $z = 0$ mm et $z = L$. Le fantôme et le support sont placés dans une chambre anéchoïque compacte ($710 \text{ mm} \times 470 \text{ mm} \times 770 \text{ mm}$) dont les parois internes sont recouvertes par 15 mm de matériau absorbant. L'exposition du fantôme est induite par un guide d'onde WR-15 ouvert placé 50 mm ($\pm 0,5$ mm) au dessus de la surface du fantôme $z = 0$ mm. Un générateur haute-puissance en bande V est utilisé pour générer un signal continu à 60 GHz via un oscillateur Gunn et un amplificateur. Tout au long de l'exposition, la puissance en sortie du générateur est mesurée en utilisant un coupleur -30 dB relié à un puissance-mètre Agilent E4418B. La distribution de température à la surface $z = 0$ mm du fantôme est mesurée pendant 1 h avec une vitesse d'enregistrement de 5 images/sec, par une caméra infrarouge (IR) haute résolution FLIR SC5000 opérant sur la gamme $2,5 - 5 \mu\text{m}$ et dont la sensibilité thermique est de $0,025^\circ\text{C}$ (le niveau de bruit typique dans les mesures est de l'ordre de $\pm 0,02^\circ\text{C}$). La température de l'air (T_{air}) est aussi relevée toutes les 30 sec par des thermomètres à fibre optique placés à 10 mm ($\pm 0,5$ mm) au dessus et en dessous du fantôme (positions notées A et B en Figure V.8a).

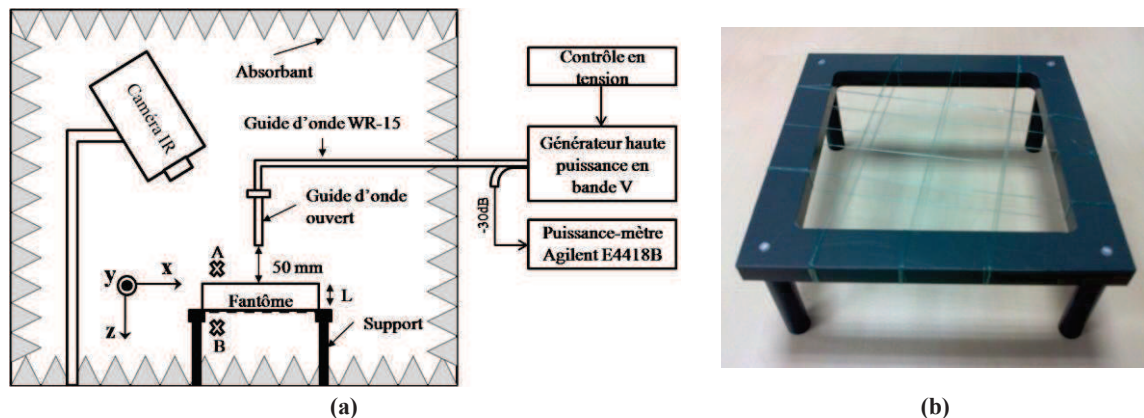


Figure V.8 - Dispositif expérimental de mesure, (a) représentation schématique et (b) photographie du support évidé sur lequel est placé le fantôme équivalent durant la mesure.

3.1.2. Protocole expérimental

Pour cette validation expérimentale, des mesures de la distribution de température à la surface du fantôme équivalent exposé pendant 1 h au rayonnement d'un guide d'onde ouvert à 60 GHz ont été répétées plusieurs fois pour différentes épaisseurs de fantôme (5 mm, 10 mm et 15 mm) dont

une épaisseur suffisamment élevée pour être représentative du comportement du modèle infini (150 mm) sur une période d'exposition de 1 h. Pour chaque mesure, un nouveau fantôme a été fabriqué en utilisant scrupuleusement la procédure décrite dans Annexe A. Après fabrication, le fantôme est placé durant 3 heures à l'intérieur de la chambre anéchoïque afin que sa température ($T_{\text{fantôme}}$) se stabilise et soit identique à celle de l'air ambiant (T_{air}). Le générateur qui est placé en dehors de la chambre est mis en fonctionnement 1 heure avant le début de l'enregistrement des mesures de température pour que la puissance injectée au guide d'onde se stabilise. La puissance en sortie du générateur est fixée à 500 mW. Ce protocole de mesure a été établi afin de garantir la reproductibilité des conditions de mesure.

3.2. Analyse numérique des incertitudes des paramètres du modèle expérimental

Cette sous-section vise à analyser numériquement l'amplitude des écarts d'élévation de température générées par les incertitudes de certains paramètres du modèle expérimental, tel que l'écartement entre le fantôme et le guide d'onde ou bien les propriétés du fantôme équivalent, ou encore les paramètres d'échanges thermiques aux interfaces air/fantôme.

3.2.1. Ecartement entre le guide d'onde et le fantôme

Dans le dispositif d'exposition expérimental du fantôme, l'écartement (H) entre la surface supérieure du fantôme et l'extrémité du guide d'onde ouvert WR-15 (3,76 mm \times 1,88 mm) est fixé à 50 mm. Cet écart est ajusté via un système de mesure à pointeur laser pour lequel l'incertitude de mesure est d'environ $\pm 0,5$ mm.

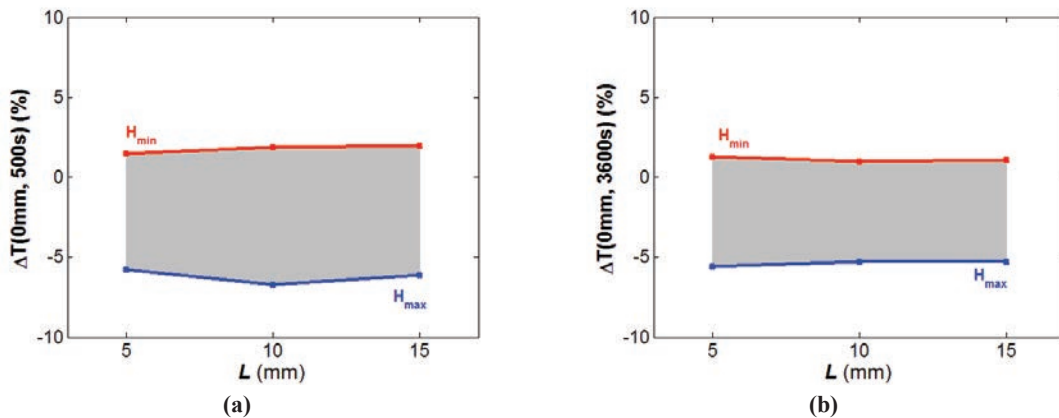


Figure V.9 - Impact de l'incertitude de positionnement du guide d'onde ouvert WR-15 sur l'élévation de température maximale en $z = 0$ mm après (a) 500 sec d'exposition et (b) 1 h d'exposition.

L'impact de cette incertitude de positionnement sur l'élévation de température en $z = 0$ est évalué numériquement avec un modèle d'exposition équivalent au dispositif de mesure pour plusieurs épaisseurs L du fantôme (Figure V.9). L'analyse de la Figure V.9 montre que, quelle que soit la durée d'exposition du fantôme équivalent, les écarts générés par l'incertitude de l'écartement H sont compris entre + 1 et + 2 % lorsque l'écartement est égal à 49,5 mm et entre - 5,3 % et - 6,7 % dans le cas où l'écartement est de 50,5 mm. L'augmentation de l'écartement H a donc un impact plus important sur les variations d'élévation de température.

3.2.2. Permittivité complexe du fantôme

L'échauffement généré par l'exposition du fantôme équivalent peut induire des variations de ses propriétés diélectriques en raison de sa forte concentration en eau. En effet, la permittivité complexe de l'eau varie en fonction de la température [2]. Dans [2], le comportement de la permittivité complexe de l'eau en fonction de la température et de la fréquence est traduit par un modèle analytique de la forme $\varepsilon(\nu, T_{eau}) = \varepsilon'(\nu, T_{eau}) + i \cdot \varepsilon''(\nu, T_{eau})$, où ν est la fréquence (Hz) et T_{eau} la température de l'eau (°C). Ce modèle est établi à partir de données expérimentales pour l'eau pure à pression atmosphérique constante, pour des variations de température comprises entre 0 - 100 °C et des variations de fréquence s'étalant de 0 - 25 THz.

Le fantôme est un mélange gélifié constitué à majorité d'eau et de poudre de polyéthylène. Pour évaluer les variations de sa permittivité complexe liées à l'augmentation de la température, une procédure de calcul utilisant le modèle analytique de la permittivité complexe de l'eau établi par Ellison [2] et l'équation de mélange de Maxwell Garnett a été utilisée. Le choix de l'équation de mélange s'est porté sur l'équation de Maxwell Garnett en raison de résultats de permittivité plus proche de ceux du fantôme à 20 °C qu'avec d'autres équations de mélange. Cette procédure est illustrée par le synoptique en Figure V.10. L'élévation de température calculée numériquement $T(z,t)$ est utilisée pour calculer la variation de permittivité complexe de l'eau $\Delta\varepsilon_{eau}$ via le modèle d'Ellison décrit dans [2]. Cette variation $\Delta\varepsilon_{eau}$ est ensuite utilisée pour calculer l'impact de l'élévation de température sur la permittivité du mélange eau + poudre de polyéthylène $\Delta\varepsilon_{mix}$ à partir de l'équation de Maxwell Garnett [3]. L'ordre de grandeur de $\Delta\varepsilon_{mix}$ est supposé comme équivalent à celui de la variation de la permittivité complexe du fantôme pour $T(z,t)$ donné : $\Delta\varepsilon_{mix} \approx \Delta\varepsilon_{fantôme}$. L'erreur d'élévation de température $\Delta T(z,t)$ engendrée par les variations de permittivité complexe du fantôme est ensuite estimée par rétro-simulation avec le modèle thermique numérique du fantôme.

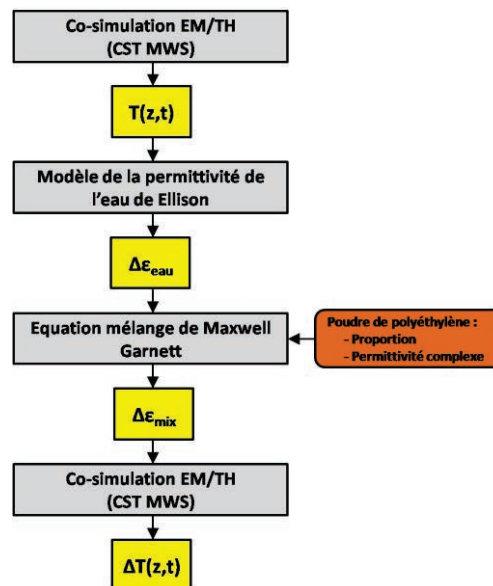


Figure V.10 -Synoptique de la procédure de calcul des déviations de température engendrées par les variations de permittivité complexe du fantôme dues à l'augmentation de température.

Les variations de la permittivité complexe du fantôme générées pour des élévations de température comprises entre 0,5 °C et 3 °C sont donc estimées en suivant la procédure Figure V.10 à partir des variations de permittivité du mélange eau + poudre de polyéthylène ε_{mix} (Figure V.11a). Les variations $\Delta\varepsilon_{fantôme}$ sont présentées en Figure V.11b, comme attendu, $\Delta\varepsilon_{fantôme}$

augmente avec la température. Lorsque l'élévation de température est seulement de 0,5 °C, $\Delta\epsilon_{\text{fantôme}}$ augmente de l'ordre de + 0,9 % pour le terme réel et de + 0,8 % pour le terme imaginaire par rapport à la permittivité complexe initiale du fantôme. Dans le cas d'une élévation de température de 3 °C les termes réels et imaginaires de la permittivité complexe du fantôme augmentent respectivement de + 5,4 % et + 4,7 %.

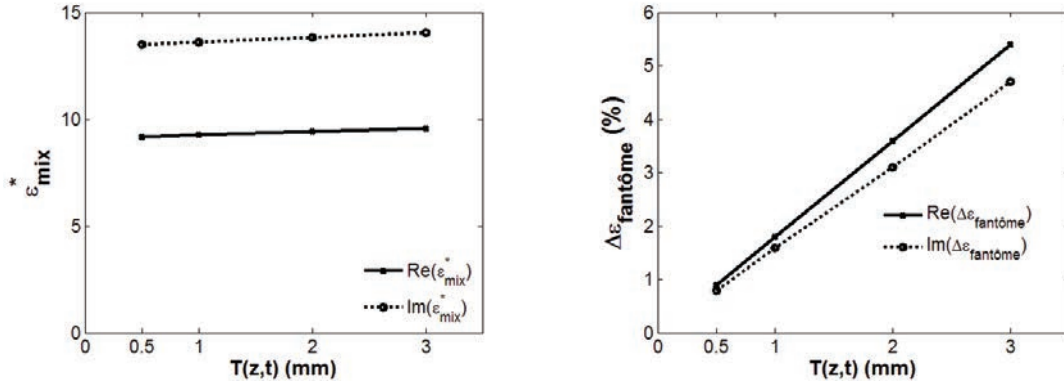


Figure V.11 - Variation de la permittivité complexe du fantôme à 60 GHz pour des élévations de température comprises entre 0,5 et 3 °C.

L'erreur sur l'élévation de température $\Delta T(0, t)$ engendrée par les variations de la permittivité complexe du fantôme, est évaluée avec le modèle numérique équivalent pour plusieurs épaisseurs de fantôme en fonction des valeurs d'élévation de température maximales à $T(0, 3600)$. Le comportement de cette erreur $\Delta T(0, t)$ en fonction de l'épaisseur L est présenté pour deux instants d'exposition en Figure V.12. Les erreurs sur l'élévation de température pouvant être induites par les variations de permittivité sont inférieures à - 1 % à 500 sec d'exposition et à - 1,5 % après 1 h quelle que soit l'épaisseur du fantôme.

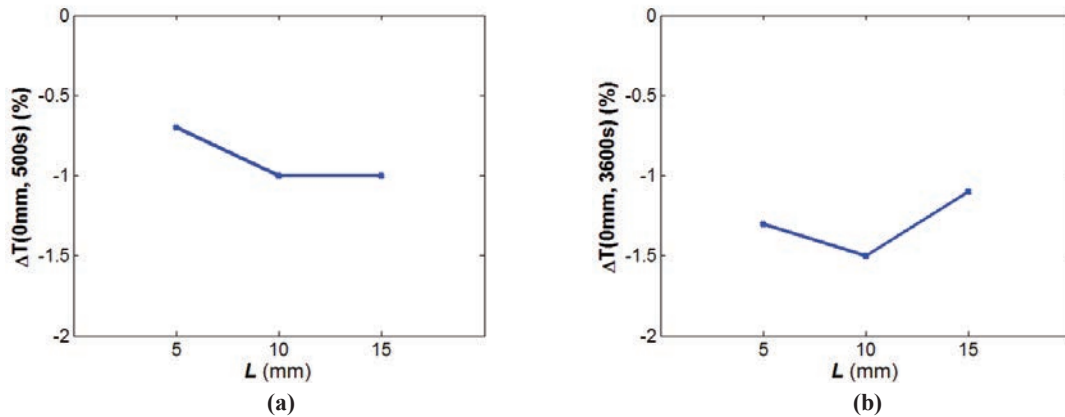


Figure V.12 - Impact des variations maximales de $\epsilon_{\text{fantôme}}$ sur l'élévation de température maximale en $z = 0$ mm après (a) 500 sec d'exposition ou bien (b) 1 h d'exposition.

3.2.3. Propriétés thermo-physiques du fantôme et paramètres d'échanges thermiques aux interfaces

Les incertitudes sur les propriétés thermo-physiques du fantôme équivalent (k , c , ρ) ainsi que les paramètres spécifiques aux échanges de chaleur aux interfaces air/fantôme (h_c , e) sont résumées dans le Tableau V.2. Pour les propriétés thermo-physiques, les incertitudes sont établies à partir des incertitudes relatives aux techniques de mesure utilisées lors de la caractérisation

expérimentale. L'incertitude du coefficient h_c à la surface du fantôme est calculée théoriquement à partir de nombres empiriques et celle sur l'émissivité est elle estimée à partir de données références pour l'eau.

Dans cette sous-section les écarts engendrés par les incertitudes listées en Tableau V.2, sont évalués numériquement à la surface $z = 0$ mm du fantôme avec un modèle numérique équivalent du modèle expérimental pour chaque propriété ou paramètre. Les analyses se concentrent sur les déviations aux instants d'exposition $t = 500$ sec et $t = 1$ h.

Tableau V.2 - Valeurs nominales et incertitudes des propriétés thermo-physiques et des paramètres liés aux transferts de chaleur aux interfaces air/fantôme.

k (W/(m·°C))	c (J/(kg·°C))	ρ (kg/m ³)	h_c (W/(m ² ·°C))	e
0,386 ± 0,019	3480 ± 180	880 ± 45	5 ± 3	0,95 ± 0,05

▪ Impact de l'incertitude de la conductivité thermique Δk

L'incertitude sur la valeur de la conductivité thermique du fantôme équivalent à 20 °C est établie à partir de la précision de mesure garantie par la méthode de la plaque chaude gardée, soit ± 5 %.

L'analyse des courbes en Figure V.13, montre que les déviations engendrées en $z = 0$ au instants d'exposition $t = 500$ sec (Figure V.13a) ou bien $t = 1$ h (Figure V.13b) sont proches quelle que soit l'épaisseur du fantôme équivalent. En effet, après 500 sec d'exposition, les écarts relevés pour le fantôme d'épaisseur 5 mm sont de l'ordre de ± 1 % ; après 1 h d'exposition ils sont légèrement supérieurs avec des valeurs comprises entre $\pm 1,25$ %. Les conclusions sont semblables pour les fantômes plus épais, avec par exemple pour le fantôme $L = 15$ mm, des écarts de ± 2 % et de $\pm 2,3$ % après respectivement 500 sec et 1 h d'exposition.

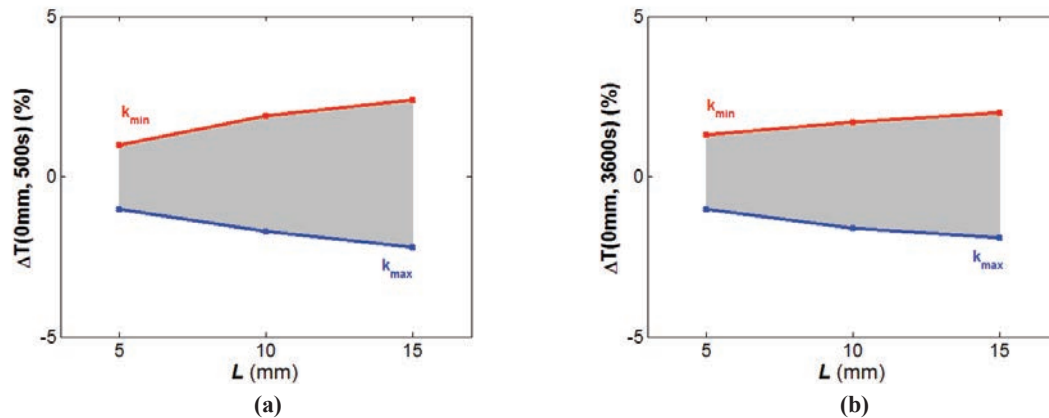


Figure V.13 - Impact de l'incertitude de k sur l'élévation de température maximale en $z = 0$ mm après (a) 500 sec ou bien (b) 1 h d'exposition.

La Figure V.13, montrent aussi que les écarts induits par l'incertitude sur la conductivité thermique ont tendance à augmenter avec l'épaisseur du fantôme. On observe que ces écarts sont seulement de $\pm 1,25$ % pour $L = 5$ mm après 1 h, alors qu'ils atteignent à $\pm 2,3$ % pour $L = 15$ mm.

■ Impact de l'incertitude du produit $\Delta(c\rho)$

Les variations de la capacité thermique sont calculées à partir de la précision de mesure du calorimètre, c'est-à-dire $\pm 5\%$. En ce qui concerne la densité du fantôme, l'incertitude est également estimée à $\pm 5\%$.

La comparaison des allures de courbes en Figure V.14 montre que, quel que soit l'instant d'exposition, les écarts ont tendance à diminuer lorsque l'épaisseur du fantôme augmente. En effet, à l'instant $t = 500$ sec les écarts induits par les variations du produit $c\rho$ sont de l'ordre de $\pm 5,8\%$ pour le fantôme $L = 5$ mm, alors qu'ils ne dépassent pas $\pm 4,2\%$ dans le cas où $L = 15$ mm à $t = 500$ sec. La comparaison des Figure V.14a et Figure V.14b, souligne aussi que les écarts générés par les incertitudes sur les paramètres c et ρ sont plus importants à 500 sec plutôt qu'après 1 h d'exposition ; par exemple les écarts pour le fantôme $L = 5$ mm passent de $\pm 5,8\%$ à $t = 500$ s à $\pm 2,6\%$ à $t = 1$ h.

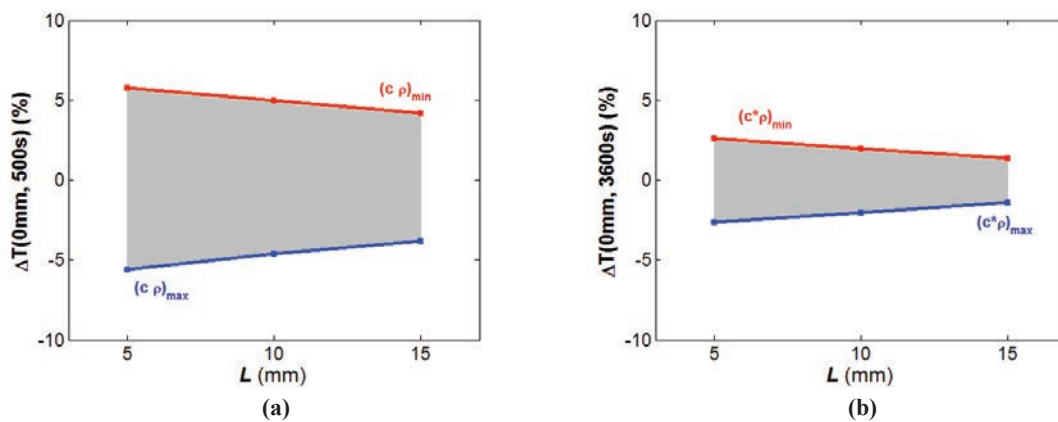


Figure V.14 - Impact de l'incertitude du produit $c\rho$ sur l'élévation de température maximale en $z = 0$ mm après (a) 500 sec ou bien (b) 1 h d'exposition.

■ Impact de l'incertitude du coefficient de transfert de chaleur par convection Δh_c

Le coefficient de transfert par convection h_c , qui définit les échanges thermiques par convection au niveau des interfaces air/fantôme, n'est pas un paramètre directement mesurable expérimentalement. Dans la littérature, plusieurs travaux ont cherché à établir les ordres de grandeur de ce paramètre pour les échanges de chaleur entre le corps et le milieu environnant [4], notamment en fonction de la posture [5] et de la zone du corps considérée [6]. Pour le fantôme, il n'existe pas de travaux similaires, et il est donc nécessaire d'estimer les valeurs de ce coefficient pour le fantôme dans les conditions spécifiques au dispositif expérimental.

L'estimation de la valeur de ce paramètre dépend de plusieurs paramètres [7], comme :

1) la nature (liquide ou gazeux) et les propriétés thermo-physiques du fluide, telles que la conduction thermique, la capacité thermique, la densité massique, mais aussi la viscosité dynamique ;

2) le type de convection qui est dite *naturelle* / *libre* si le fluide est mis en mouvement par la différence de masse volumique qui résulte des différences de température au niveau de l'interface ou bien par les forces externes comme la pesanteur, ou *forcée* si le mouvement du fluide est généré par un dispositif tel qu'une pompe ou bien un ventilateur ;

3) le régime de l'écoulement qui peut être soit *laminaire* ou bien *turbulent* ; notons que l'écoulement turbulent est beaucoup plus favorable aux échanges de chaleur ;

- 4) la température ;
 5) et la forme et les dimensions de la surface d'échange.

Pour estimer, la valeur du coefficient h_c il faut commencer par déterminer la nature du fluide en contact avec la surface chaude. Ici le fluide est tout simplement l'air ; ses propriétés thermo-physiques sont fortement dépendantes de la température. Les valeurs des différentes propriétés de l'air sont données dans le Tableau V.3 pour des conditions de pression et de température ambiantes.

Tableau V.3 - Caractéristiques thermo-physiques de l'air dans des conditions ambiantes [7].

k_{air} (W/(m·°C))	c_{air} (J/(kg·°C))	ρ_{air} (kg/m ³)	μ_{air} (kg/(m·s))	T_{air} (°K)	v_{air} (m/s)
0,026	1005	1,22	$1,81 \times 10^{-5}$	293,15 (20°C)	0,1-2

Ensuite il faut déterminer le type de convection. Dans le cas du dispositif de mesure utilisé la convection est naturelle puisque il n'y a pas dans la chambre de mesure de système de ventilation, et la climatisation de la pièce est arrêtée durant les mesures. Pour déterminer le régime de l'écoulement de l'air, il est nécessaire de calculer le nombre de Reynolds (R_e) et de comparer la valeur obtenue à la valeur critique (R_{ec}) qui marque le passage d'un régime à l'autre. Cette valeur critique pour un flux circulant sur une surface plane varie entre 10^5 et 3×10^6 en fonction notamment de la rugosité de la surface. La valeur $R_{ec} = 5 \times 10^5$ est souvent utilisée comme la valeur représentative du seuil critique entre les régimes lorsque la surface est suffisamment lisse. Si $R_e < R_{ec}$, alors le régime d'écoulement est laminaire ; dans le cas contraire le régime est turbulent. Le nombre de Reynolds est calculé analytiquement par l'expression analytique suivante

$$R_e = \frac{v_{air} \cdot \rho_{air} \cdot D_{surface}}{\mu_{air}}, \quad (7)$$

où v_{air} est la vitesse caractéristique de l'air (m/s), ρ_{air} est la densité de l'air (kg/m³), $D_{surface}$ est la dimension caractéristique du fantôme égale à 0,1 m dans le dispositif d'exposition considéré, et μ_{air} est la viscosité dynamique de l'air (kg/(m·s)). En utilisant les valeurs fournies dans le Tableau V.3, on trouve la valeur de R_e comprise entre $0,0067 \times 10^5$ et $0,135 \times 10^5$, ce qui signifie donc que le régime d'écoulement est laminaire.

Il est possible de déterminer la valeur de coefficient de transfert par convection h_c , en utilisant l'expression du nombre de Nusselt (N_u) qui est relié à h_c par l'expression suivante

$$N_u = \frac{h_c \cdot D_{surface}}{k_{air}} \quad (8)$$

où k_{air} est la conductivité thermique de l'air (W/(m·°C)). Ce nombre de Nusselt peut aussi être exprimé de façon empirique suivante

$$N_u = C \cdot R_e^m \cdot P_r^n \quad (9)$$

où C , m et n dépendent entre autre du régime de l'écoulement, et où P_r est le nombre de Prandtl donné par

$$P_r = \frac{c_{air} \cdot \mu_{air}}{k_{air}} \quad (10)$$

où c_{air} est la capacité thermique de l'air (J/(kg·°C)). Dans le dispositif la valeur de P_r égale à 0,7. Dans le cas d'un régime laminaire le nombre de Nusselt peut être calculé analytiquement avec l'expression suivante si $P_r \geq 0.6$

$$N_u = 0.332 \cdot R_e^{1/2} \cdot P_r^{1/3}. \quad (11)$$

Pour une vitesse de l'air assumée entre 0,1 et 2 m/s et une température ambiante de 20 °C, on obtient donc par le calcul une estimation du coefficient de transfert par convection h_c compris entre 1,98 et 8,91 W/(m²·°C), d'où l'incertitude donnée dans le Tableau V.2.

Le comportement des écarts en fonction de l'épaisseur L est similaire au deux instants d'exposition. Les écarts sont plus importants pour les fantômes fins, avec des écarts atteignant jusqu'à + 30 % de la valeur d'élévation de température nominale à $t = 1$ h lorsque $L = 5$ mm pour $h_c = 2$ W/(m²·°C), contre + 14,7 % pour $L = 15$ mm.

L'autre tendance importante à souligner ici, est que les écarts augmentent avec la durée de l'exposition. En effet, à $t = 500$ sec, l'écart engendré par $h_c = 2$ W/(m²·°C) pour $L = 5$ mm est de + 8,8 % contre + 30 % à $t = 1$ h. Le constat est identique pour le fantôme $L = 15$ mm dont l'écart engendré par $h_c = 8$ W/(m²·°C) passe de - 4 % à $t = 500$ sec à - 11,6 % à $t = 1$ h.

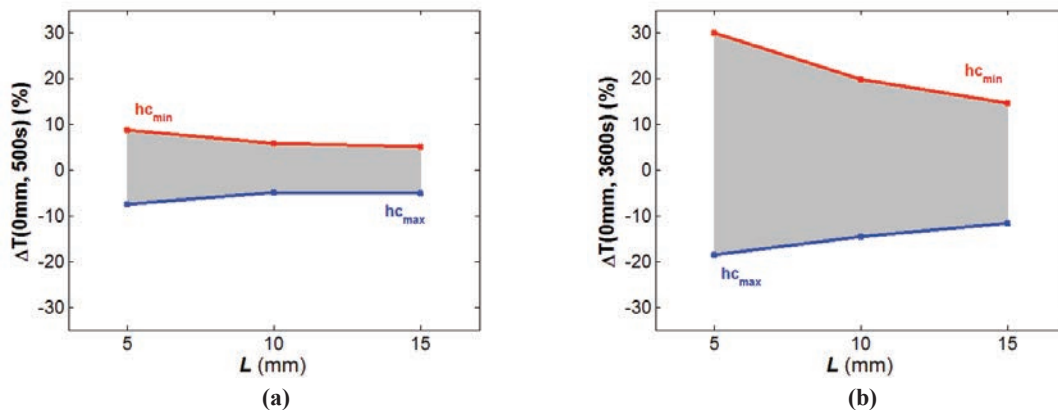


Figure V.15 - Impact de l'incertitude de h_c sur l'élévation de température maximale en $z = 0$ mm après (a) 500 sec ou bien (b) 1 h d'exposition.

▪ Impact de l'incertitude de l'émissivité ϵ

L'émissivité est un paramètre spécifique à un matériau donné qui caractérise sa capacité à dissiper de la chaleur vers le milieu extérieur par rayonnement. Ce paramètre rentre en compte dans le calcul analytique du coefficient de transfert de chaleur par rayonnement h_r . Dans le cas de la peau humaine, l'émissivité est très proche de 1 en raison notamment de sa forte concentration en eau (l'émissivité de l'eau est de l'ordre de 0,95). Ses valeurs sont généralement comprises entre 0,96 et 0,98 [7] [8]. Pour le fantôme équivalent de la peau humaine, dont le constituant principal est l'eau, une valeur d'émissivité dans le même ordre de grandeur que la peau ou bien l'eau est supposée, c'est-à-dire, une émissivité de 0,95 avec une incertitude de $\pm 0,05$.

Les écarts induits par l'incertitude de l'émissivité ϵ sont présentés en Figure V.16, où deux tendances sont observées. La première est que les écarts sont plus élevés dans les fantômes d'épaisseur faible quel que soit l'instant d'exposition. A $t = 1$ h (Figure V.16b) par exemple, les écarts relevés pour le fantôme d'épaisseur $L = 5$ mm sont de $\pm 1,85$ %, alors qu'ils sont seulement de ± 1 % pour le fantôme plus épais $L = 15$ mm. La seconde tendance est elle remarquable lorsque les écarts Figure V.16b sont comparés à ceux en Figure V.16a. En effet, les écarts sont plus faibles lorsque $t = 500$ sec que lorsque $t = 1$ h. Ils sont par exemple pour $L = 5$ mm de l'ordre de $\pm 0,65$ % en Figure V.16a, et ils passent à $\pm 1,85$ % en Figure V.16b.

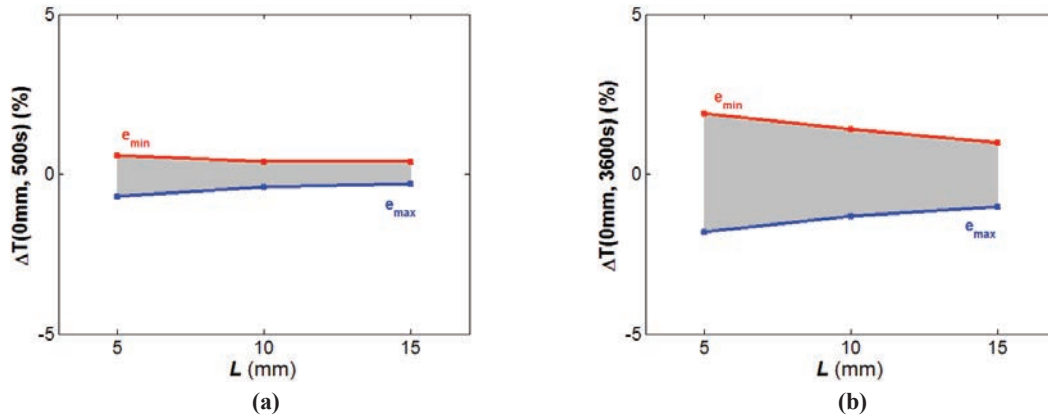


Figure V.16 - Impact de l'incertitude de e sur l'élévation de température maximale en $z = 0\text{ mm}$ après (a) 500 sec ou bien (b) 1 h d'exposition.

3.2.4. Bilan

La Figure V.17 illustre les écarts maximaux induits par les effets des incertitudes sur chacun des paramètres du modèle expérimental pour plusieurs épaisseurs de fantôme (5 mm, 10 mm et 15 mm) à deux instants d'exposition (500 sec et 1 h), pour deux configurations : 1) la configuration qui génère les élévations de température les plus élevées (k_{\min} , $(c \cdot \rho)_{\min}$, $h_{c\min}$, e_{\min}) et 2) celle qui génère les plus faibles (k_{\max} , $(c \cdot \rho)_{\max}$, $h_{c\max}$, e_{\max}). L'analyse de ces figures met en avant deux conclusions.

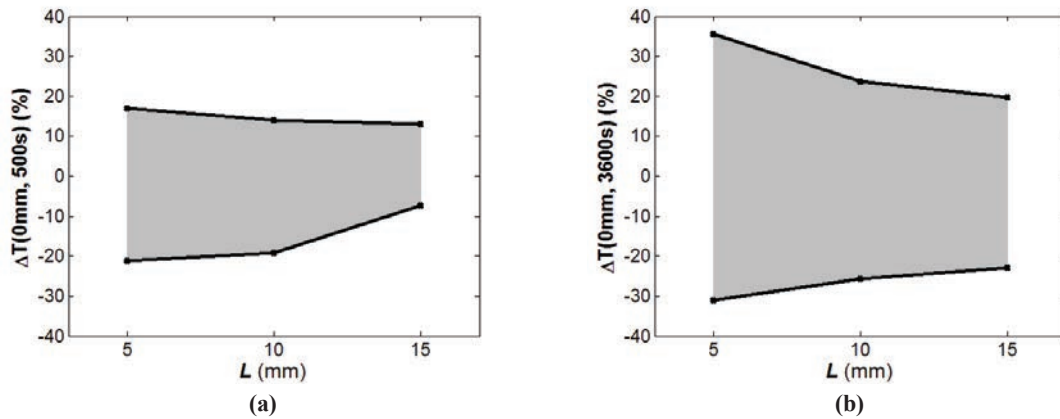


Figure V.17 - Impact de l'incertitude globale sur l'élévation de température maximale en $z = 0\text{ mm}$ après (a) 500 sec d'exposition ou bien (b) 1 h d'exposition.

Premièrement, on constate que l'amplitude des écarts d'élévation de température augmente avec la durée d'exposition et cela, quelle que soit l'épaisseur du fantôme. En effet, les écarts à l'instant $t = 500\text{ sec}$ sont de l'ordre de $\pm 20\%$ pour le fantôme d'épaisseur $L = 5\text{ mm}$, $\pm 15\%$ pour $L = 10\text{ mm}$ et $\pm 10\%$ pour $L = 15\text{ mm}$; ils passent respectivement à $\pm 30\%$, $\pm 25\%$ et $\pm 20\%$ après 1 h d'exposition.

Deuxièmement, les écarts sont plus élevés dans les fantômes fins, et cela quel que soit l'instant d'exposition. Ce phénomène s'explique notamment par la contribution majeure des écarts induits par l'incertitude du coefficient de transfert par convection h_c . Par exemple, après 1 h d'exposition, l'écart maximal pour le fantôme d'épaisseur 5 mm est de $+35,8\%$, l'écart induit par h_c génère à lui seul un écart de $+30\%$ pour cette épaisseur de fantôme, ce qui contribue à environ 72 % de la variation totale. Pour le fantôme le plus épais ($L = 15\text{ mm}$), l'écart maximal généré par l'ensemble

des incertitudes est de - 22 % à $t = 1$ h, pour cette épaisseur la part de l'écart à imputer au coefficient h_c est de - 11.6 %, l'impact du coefficient h_c représente donc 53 % des écarts cumulés.

3.3. Validation expérimentale du comportement thermique du fantôme

Dans cette sous-section, les élévations de température mesurées pendant 1 h à la surface du fantôme équivalent de la peau humaine, avec une technique de mesure par thermométrie infrarouge, sont présentées pour différentes épaisseurs de fantôme, à savoir 5 mm, 10 mm, 15 mm et 100 mm (Figure V.18). La dernière épaisseur peut-être considérée comme équivalente au modèle semi-infini par la durée d'exposition expérimentale.

Pour chaque épaisseur, au moins trois mesures ont été réalisées en suivant le protocole de mesure décrit en sous-section 3.1.2 (Figure V.18 (i)). Les courbes en pointillé noir en Figure V.18 (ii) représentent les élévations de température moyennes mesurées sur une zone de 1 cm² à la surface du fantôme dans l'alignement du guide d'onde. Les barres d'erreur sur les courbes représentent les écarts-types entre les différentes mesures réalisées pour chaque épaisseur de fantôme. Ces écarts-type sont donnés avec un pas de 500 sec. Les zones grisées représentent, pour chaque épaisseur, l'intervalle de confiance établi à la suite de l'étude paramétrique numérique réalisée en section 3.2 en prenant en compte les incertitudes des paramètres du modèle expérimental.

L'analyse des résultats expérimentaux présentés en Figure V.18 amène à trois observations importantes, qui sont données et détaillées dans ce qui suit.

La première est la bonne reproductibilité des mesures quelle que soit l'épaisseur du fantôme. En effet, les écarts-types sont de l'ordre de 14 %, 5 % ou bien 5,5 % pour respectivement les épaisseurs 5 mm, 10 mm et 15 mm. Cependant, il est important de noter que les écarts-types augmentent avec la durée d'exposition. Ce phénomène s'explique principalement par l'erreur de mesure et les variations de coefficient de transfert thermique par convection h_c qui ne peuvent pas être précisément évaluées avec par le dispositif de mesure.

La deuxième est le bon accord entre les résultats expérimentaux et numériques pour chaque épaisseur de fantôme. En effet, les dynamiques d'élévation de température sont, quelle que soit la valeur de L , comprises à l'intérieur de l'intervalle de confiance numérique en gris sur les figures. Il est important de remarquer ici que l'intervalle de confiance pour le fantôme le plus fin (Figure V.18a) est beaucoup plus large que dans les autres cas en raison de l'impact plus important de l'incertitude du coefficient h_c sur la dynamique de l'élévation de température.

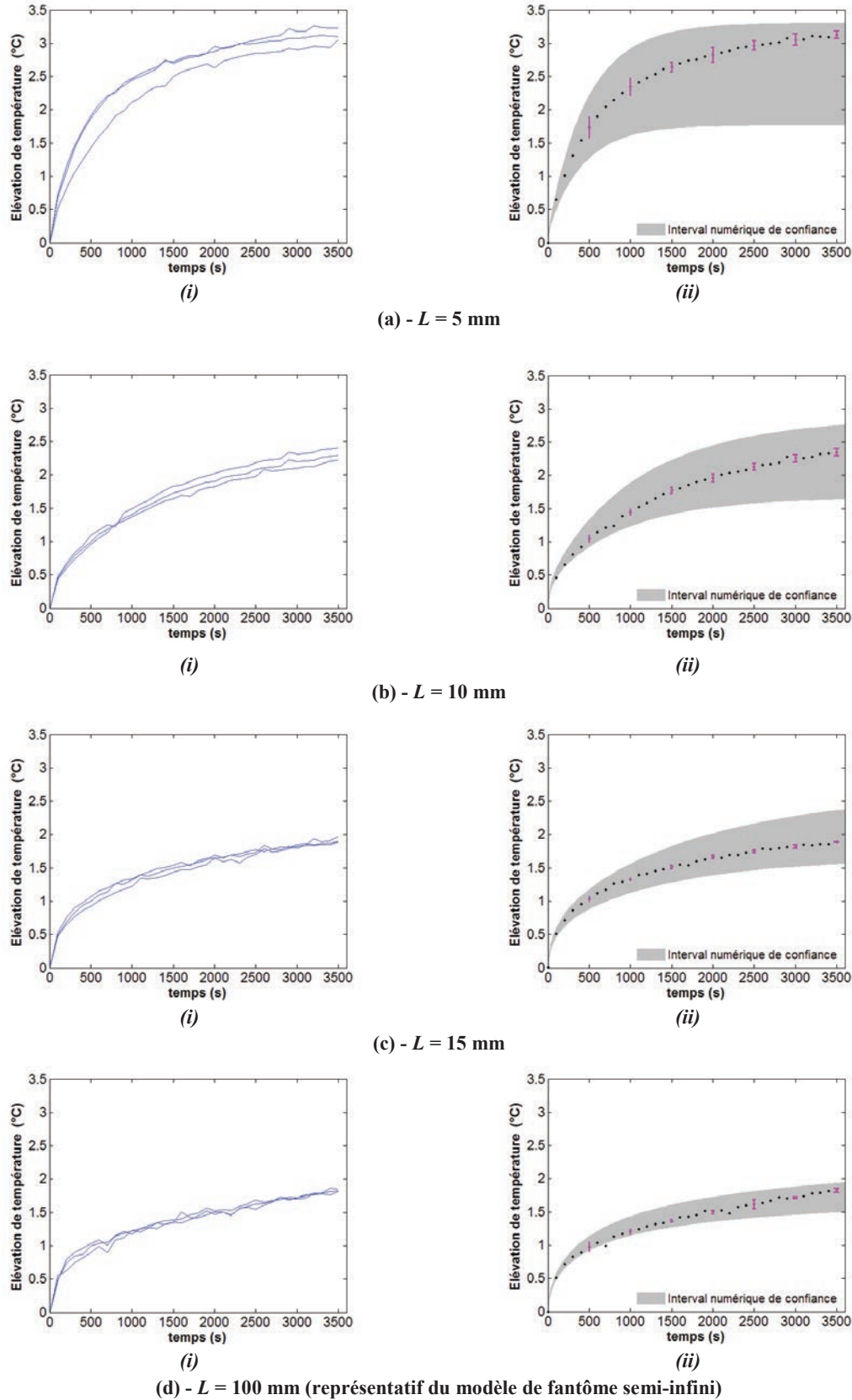


Figure V.18 - Mesures des élévations de température et comparaison aux plages d'incertitude numériques pour des fantômes d'épaisseur. (i) Reproductibilité de mesure et (ii) élévation de température moyenne (en pointillé noir) où les barres d'erreur représentent l'écart type entre les mesures.

La troisième est que, semblablement aux cas analytiques et numériques présentés en Figure V.5a, la dynamique de l'élévation de température expérimentale est plus importante dans les fantômes fins, et elle tend vers celle du fantôme à épaisseur semi-infini lorsque l'épaisseur augmente. Les courbes en Figure V.19 montrent l'évolution de l'élévation de température à deux instants d'exposition (500 sec et 3600 sec). Après 500 sec d'exposition, les écarts entre les fantômes les plus épais ($L = 10$ mm ou 15 mm) et celui considéré comme à épaisseur semi-infini sont faibles et très proches (respectivement + 7 % et + 6 %), alors que pour le fantôme le plus fin ($L = 5$ mm) l'écart est presque doublé à cet instant de l'exposition (+ 93 %). Après 1 h, la tendance marque très visiblement la convergence des dynamiques lorsque L tend vers celle du fantôme semi-infini. Les écarts de température relevés sont de l'ordre de + 73 %, + 28 % ou + 3 % pour des épaisseurs respectives de 5 mm, 10 mm et 15 mm.

Ces données expérimentales procurent donc une validation des conclusions analytique et numérique évoquées pour le comportement thermique du fantôme en fonction de l'épaisseur L .

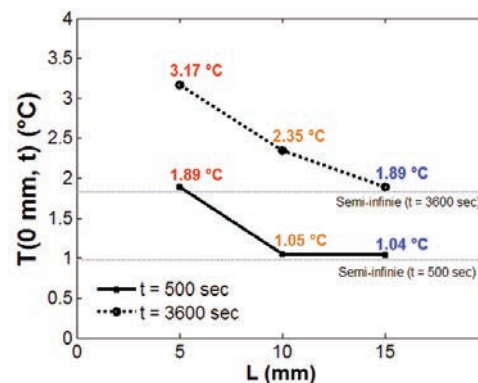


Figure V.19 - Evolution de l'élévation de température mesurée après 500 sec et 1 h d'exposition pour différentes épaisseurs du fantôme équivalent.

4. Comparaison au modèle numérique multicouche de tissus

Dans leurs travaux Alekseev *et al.* [9] et Kanezaki *et al.* [10] ont mis en avant l'intérêt du modèle multicouche de tissus pour les études dosimétriques thermiques en bande millimétrique. En effet, si la profondeur de pénétration du rayonnement électromagnétique en bande millimétrique se limite à la peau, l'échauffement induit par l'absorption de ce rayonnement peut affecter des tissus plus en profondeur en raison de la diffusion thermique.

Cependant, à notre connaissance, il n'existe pas actuellement de fantôme expérimental du corps humain multicouche à 60 GHz, ou bien en bande millimétrique, qui soit à la fois un équivalent électromagnétique et thermique du corps humain. De plus, un tel fantôme, pour représenter de façon très réaliste le comportement thermique des tissus exposés, devrait inclure un système interne de dissipation de chaleur à l'effet semblable à celui du flux sanguin, dont l'impact sur la dynamique de température a été montré dans [10]. Il paraît alors essentiel de comparer le comportement thermique du fantôme homogène d'épaisseur finie à celui du modèle de tissus multicouches du corps humain, pour mettre en avant les conditions dans lesquelles le fantôme peut-être un équivalent thermique du corps humain.

Dans cette sous-section les particularités du modèle multicouche sont analysées et comparées à celles du modèle de fantôme homogène. Un modèle numérique multicouche de tissus est défini sous le logiciel CST MWS permettant d'évaluer numériquement les élévations de température dans les différentes couches de tissus pour différentes combinaisons de propriétés thermo-physiques, de flux sanguin et d'épaisseur de couches, qui sont ensuite comparées à l'élévation de température dans le fantôme homogène.

4.1. Structure et particularités du modèle de tissus multicouches

Pour cette étude le modèle multicouche de tissus décrit en Figure V.20 est considéré. Ce modèle est composé de trois couches de tissus différents : peau, graisse et muscle. Chaque tissu possède ses propres caractéristiques électromagnétiques (avec ϵ_i^* pour la permittivité complexe), propriétés thermo-physiques (avec ρ_i est la densité massique, c_i la capacité thermique et k_i la conductivité thermique), et flux sanguin (avec f_i un coefficient relatif au flux sanguin). Le flux sanguin est considéré dans le modèle comme un mécanisme de dissipation de chaleur [11].

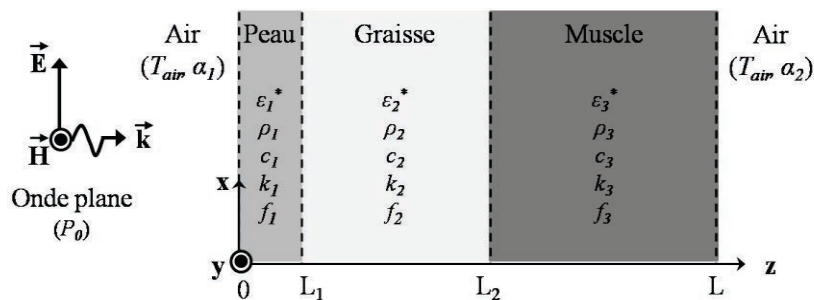


Figure V.20 - Schéma théorique simplifié de la structure multicouches 1D d'une partie du corps humain exposée à une onde plane en bande millimétrique.

Comme dans le cas du modèle de fantôme homogène, la structure multicouche possède une épaisseur finie L et deux interfaces avec l'air en $z = 0$ mm et $z = L$. Elle est exposée à une onde

plane en incidence normale avec une densité de puissance incidente P_0 . En revanche, à la différence du fantôme homogène, le modèle multicouche présente deux interfaces thermiques supplémentaires solide/solide (cf chapitre IV section 2.3) en $z = L_1$ et $z = L_2$. Les transferts de chaleur à travers ces types d'interfaces sont liés au rapport entre les coefficients de conductivité thermique des tissus de part et d'autre de l'interface. Si le rapport est inférieur à 1 on a une accumulation de chaleur dans la couche en amont de l'écoulement de chaleur, et au contraire si le rapport est supérieur à 1 la chaleur s'écoule dans la couche en aval.

4.2. Modèle numérique multicouche du corps humain exposé

4.2.1. Modèle électromagnétique

L'exposition du modèle multicouche de tissus à une onde plane est modélisée électromagnétiquement avec le solveur temporel de CST MWS afin de calculer la distribution de champs dans la structure qui est utilisée comme source de chaleur dans le module CST MPS, permettant d'évaluer l'échauffement dans les différentes couches de tissus.

Le modèle multicouche de tissus est un parallélépipède planaire de côté 10 mm et d'épaisseur L . Il est composé de trois matériaux différents, un pour chaque tissu, dont les permittivités complexe à 60 GHz sont extraites de [12] et donnée en Tableau V.4. L'onde plane est définie par un vecteur champ électrique d'amplitude 86,8 V/m (équivalent à $P_0 = 10 \text{ W/m}^2$) orienté perpendiculairement à la surface de la structure avec $z = 0 \text{ mm}$. Les conditions limites sont identiques à celles choisies pour le modèle homogène du fantôme présenté dans la sous-section 2.1 (conducteur magnétique parfait (PMC) suivant x , conducteur magnétique parfait (PEC) suivant y et absorbant parfait (PML) suivant z), et permettent de garantir une propagation homogène de l'onde plane. Et un maillage local $\lambda_g/50$ est aussi utilisé pour mailler finement l'épaisseur de la structure multicouche entre 0 et 0,5 mm, le reste du maillage étant fixé à $\lambda_g/20$.

Tableau V.4 - Permittivités complexes ϵ_i^* des tissus du modèle multicouches à 60 GHz [12].

Peau	Graisse	Muscle
7,98 - j10,90	3,13 - j0,84	12,86 - j15,83

4.2.2. Modèle multi-physiques

Dans le modèle multi-physiques de tissus multicouches, la source d'échauffement est importée du fichier de simulation électromagnétique. Le modèle multicouche thermique se compose trois matériaux différents relatifs à chaque type de tissu. Les propriétés thermo-physiques de chaque tissu sont tirées de la base de données établie dans [13] et sont résumées dans le Tableau V.5. Dans ce tableau sont données les valeurs moyennes et les écart-types de la masse volumique ρ_i , de la capacité thermique c_i et de la conductivité thermique k_i pour chaque couche de tissus du modèle.

Dans le modèle thermique, des conditions limites de type adiabatiques ont été choisies pour les frontières de simulation suivant les directions x et y afin de garantir une diffusion homogène de la chaleur dans l'épaisseur du modèle suivant z . Les échanges thermiques vers l'air sont régis par deux paramètres : le coefficient de transfert par convection h_c et l'émissivité e imposés respectivement à $5 \text{ W/(m}^2 \cdot ^\circ\text{C)}$ et à 1.

Tableau V.5 - Propriétés thermo-physiques des tissus du modèle multicouches de tissus [13].

	Peau	Graisse	Muscle
ρ_i (kg/m ³)	1109 ± 14	911 ± 53	1090 ± 52
c_i (J/(kg·°C))	3391 ± 233	2348 ± 372	3421 ± 460
k_i (W/(m·°C))	0,372 ± 0,059	0,211 ± 0,021	0,495 ± 0,042

4.3. Ecart avec le modèle homogène du fantôme de la peau humaine

Dans cette sous-section, les écarts estimés numériquement entre le modèle de fantôme homogène et le modèle multicouches de tissus pour des conditions d'exposition équivalentes sont comparés et analysés. Les impacts des variations des paramètres thermo-physiques, des épaisseurs de couches, et du flux sanguin dans les tissus sont analysés séparément. Les résultats numériques obtenus avec un modèle multicouches d'épaisseur $L = 15$ mm sont comparés aux résultats du fantôme homogène lui aussi d'épaisseur 15 mm en terme de dynamique d'élévation de température sur 1 h d'exposition en $z = 0$ et de distribution d'élévation de température suivant z après 500 sec d'exposition. Pour l'analyse des variations des paramètres thermo-physiques et des épaisseurs de couches de tissus, les valeurs de flux sanguin sont considérées nulles quelle que soit la couche de tissu.

4.3.1. Impact des paramètres thermo-physiques

Deux combinaisons de paramètres thermo-physiques tirées des valeurs données dans Tableau V.5 ont été évaluées numériquement. Ces combinaisons sont respectivement le cas où les propriétés sont les plus favorables à l'élévation de la température dans les tissus (ρ_{min} , c_{min} , k_{min}) et au contraire le cas où l'échauffement des tissus est limité (ρ_{max} , c_{max} , k_{max}). Les élévations de température obtenues numériquement avec ces deux combinaisons sont comparées aux résultats moyens obtenus pour le modèle numérique du fantôme homogène en Figure V.21. Précisons que les épaisseurs de peau et de graisse sont respectivement de 1 mm et 3 mm.

Les zones grisées en Figure V.21, définissent les plages de variations d'élévation de température générées par les variations des propriétés thermo-physiques des couches de tissus (Tableau V.5). L'analyse de la Figure V.21a montre qu'avant 500 sec d'exposition, la dynamique d'élévation de température obtenue avec le modèle de fantôme homogène est plus faible que de celles obtenues avec le modèle multicouches. Cette observation s'explique par la présence de la couche de graisse à une faible profondeur sous la surface exposée. La couche de graisse dont la conductivité est inférieure à celle de la couche de peau (Tableau V.5) induit donc un effet adiabatique qui «bloque» l'écoulement de chaleur et génère un échauffement plus important à la surface de la couche de peau en comparaison à celui à la surface du fantôme homogène [10]. L'effet de la couche de graisse est mis en évidence par la distribution d'élévation de température à 500 sec d'exposition présentée en Figure V.21b. En effet, entre 1 et 4 mm de profondeur, les pentes des distributions obtenues pour le modèle de tissus multicouches sont plus élevées que dans le cas du modèle de fantôme homogène. De plus, entre 0 et 1 mm, l'élévation de température calculée avec le modèle de fantôme est inférieure ou en limite de la zone grisée, alors qu'entre 4 et 15 mm d'épaisseur la température est cette fois supérieure à celle de la zone grisée.

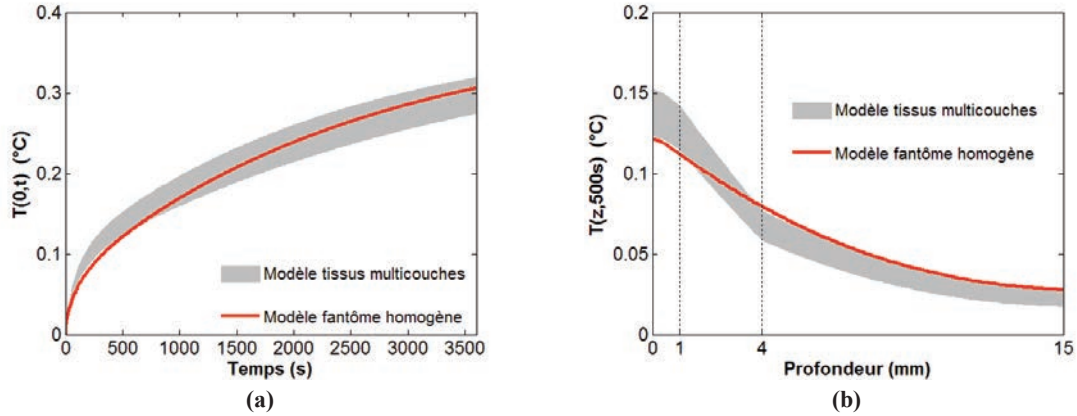


Figure V.21 - Impacts des variations des propriétés thermo-physiques du modèle de tissus multicouches (zones grisées), et comparaison avec les résultats obtenus avec modèle thermique du fantôme équivalent d'épaisseur 15 mm (a) dans le temps à l'interface $z = 0$ mm et (b) suivant la profondeur z du fantôme après 500 sec d'exposition.

4.3.2. Impact des épaisseurs des couches de tissus

Les variations des épaisseurs des couches de peau et de graisse de la structure multicouche sont estimées à partir de [10], [14], [15]. Deux structures multicouches sont considérées, une structure combinant épaisseur maximale de peau (3 mm) et épaisseur minimale de graisse (1 mm), et une autre qui au contraire minimise l'épaisseur de peau (0,5 mm) et maximise l'épaisseur de graisse (6 mm). Si on se base sur les conclusions de [10], la première combinaison (Figure V.22a) favorise la dissipation de chaleur dans le corps et donc réduit l'élévation de température à la surface $z = 0$ induite par l'absorption électromagnétique ; à l'opposé, la seconde combinaison accroît l'échauffement à la surface $z = 0$ du fait de la proximité entre l'interface air/peau et peau/graisse (seulement 0,5 mm). La comparaison des résultats thermiques de ces deux modèles doit permettre de quantifier l'impact que peuvent générer les variations d'épaisseur de couches de tissus sur l'élévation de température induite par une exposition équivalente ($P_0 = 10 \text{ W/m}^2$) à une onde plane à 60 GHz. Pour chaque tissu ce sont les valeurs moyennes des propriétés thermo-physiques qui sont considérées dans les calculs numériques.

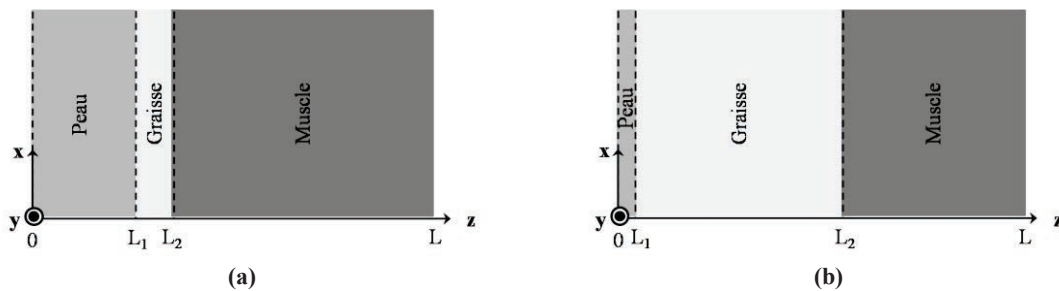


Figure V.22 - Structure de tissus multicouche induisant une élévation de température en surface $z = 0$ mm (a) minimale ($L_1 = 3 \text{ mm}$ et $L_2 = 4 \text{ mm}$) et (b) maximale ($L_1 = 0,5 \text{ mm}$ et $L_2 = 6,5 \text{ mm}$).

Les élévations de température obtenues numériquement avec le modèle multicouche a et b sont présentées en Figure V.23 en termes de dynamique d'élévation de température sur 1 h et de distribution dans l'épaisseur des modèles. L'analyse de la Figure V.23a montre que la dynamique d'élévation de température dans le fantôme est proche des dynamiques du modèle multicouches de tissus. Entre le début et 2500 sec d'exposition, la dynamique du fantôme est comprise dans la gamme de celles du modèle multicouches de tissus (zone grisée). Au delà de 2500 sec, l'élévation de température à la surface du fantôme est plus élevée que dans le modèle multicouches, + 2 %

par rapport à l'élévation de température obtenue avec la structure illustrée en Figure V.22b après 1 h d'exposition et + 8,5 % avec la valeur obtenue avec la structure Figure V.22a. La comparaison des distributions de température calculées numériquement avec le fantôme et les structures multicouches met en évidence que si l'élévation de température en surface du fantôme est comprise dans la gamme de celles du modèle multicouches, ce n'est pas le cas dans toute l'épaisseur.

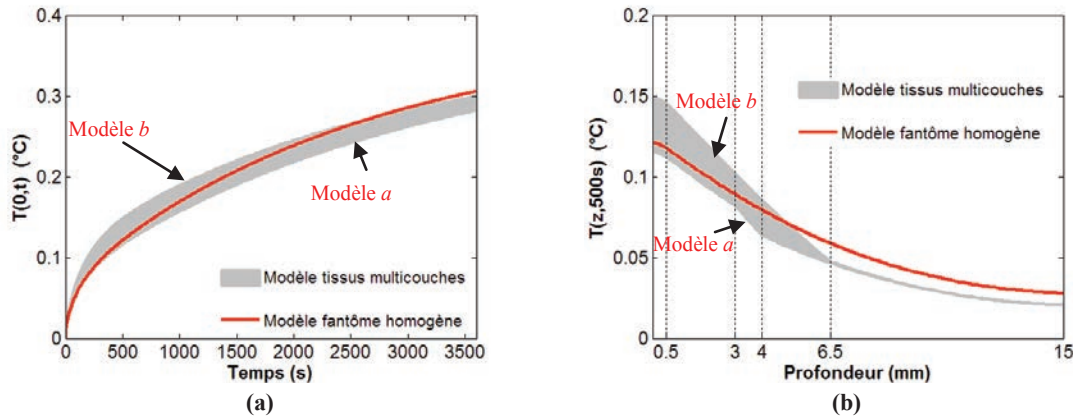


Figure V.23 - Impacts des variations des épaisseurs de tissus du modèle multicouches (zones grisées), et comparaison avec les résultats obtenus avec modèle thermique du fantôme équivalent d'épaisseur 15 mm (a) dans le temps à l'interface $z = 0$ mm et (b) suivant la profondeur z du fantôme après 500 sec d'exposition.

4.3.3. Impact du flux sanguin

Comme l'ont montré Alekseev *et al* dans [9], le flux sanguin peut avoir un impact important sur l'élévation de température en surface du corps. Les coefficients de flux sanguin considérés dans cette sous-section sont établis à partir de la base de données [13], qui procure le taux de transfert de chaleur par le sang f_{tissu} (ml/(min·kg)) pour chaque tissu du corps humain en précisant l'écart-type, ainsi que les valeurs moyennes de capacité thermique et densité massique du sang ($c_{sang} = 3615$ J/(kg·°C) et $\rho_{sang} = 1050$ kg/m³), permettant de calculer le coefficient du flux sanguin utilisé dans le modèle numérique en W/(m³·°C) à partir de

$$V_{tissu} = f_{tissu} \cdot c_{sang} \cdot \rho_{sang} \cdot \quad (12)$$

Les valeurs des coefficients du flux sanguin calculés avec (12) ainsi que les écart-types sont données dans le Tableau V.6. Ils sont utilisés dans un modèle numérique multicouches de tissus où les propriétés thermo-physiques sont les valeurs moyennes du Tableau V.5, et où l'épaisseur de peau est de 1 mm et celle de graisse est 3 mm.

Tableau V.6 - Coefficient du flux sanguin dans les tissus humain en W/(m³·°C) [13].

Peau	Graisse	Muscle
6748 ±2328	2074 ±816	2328 ±831

Les résultats obtenus pour le modèle multicouches avec flux sanguin en termes de dynamique et de distribution d'élévation de température sont présentés en Figure V.24 pour la combinaison des valeurs maximales de coefficient de flux sanguin induisant les dissipations de chaleur les plus faibles, ainsi que pour la combinaison des valeurs minimales produisant les élévations de température maximales. L'analyse de la Figure V.24a montre que, si pour des expositions courtes (< 500 sec) la dynamique en surface du fantôme a un comportement semblable à celles en surface

du modèle multicouche, au delà, l'élévation de température est en revanche plus rapide. Ce comportement s'explique par la dissipation de chaleur par le sang dans le modèle multicouche qui est un mécanisme absent dans le fantôme. Si après 500 sec l'élévation de température sur le fantôme est seulement de + 0,8 % à + 11 % plus élevée que pour le modèle multicouche, après 1 h d'exposition les écarts grimpent à + 61 % et + 120 %.

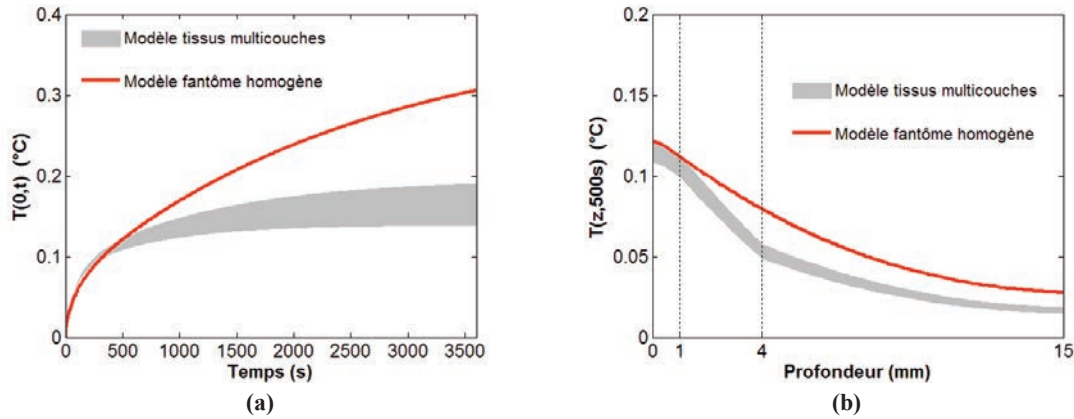


Figure V.24 - Impacts des variations du coefficient de flux sanguin dans les tissus du modèle multicouches (zones grisées), et comparaison avec les résultats obtenus avec modèle thermique du fantôme équivalent d'épaisseur 15 mm (a) dans le temps à l'interface $z = 0$ mm et (b) suivant la profondeur z du fantôme après 500 sec d'exposition.

4.3.4. Bilan

Les effets combinés des variations des propriétés thermo-physiques, des épaisseurs de couches et des coefficients de flux sanguin des différents tissus du modèle multicouches sur la dynamique en $z = 0$ et la distribution après 500 sec d'exposition de l'élévation de température sont analysés et comparés au comportement du modèle de fantôme homogène en Figure V.25. L'analyse séparée des effets des variations des paramètres du modèle a permis de quantifier la contribution de chacun. Si les élévations de température induites par les variations des propriétés thermo-physiques ou par les épaisseurs de couches induisent des déviations avec le modèle de fantôme homogènes inférieures à ± 10 % après 1 h d'exposition, la prise en compte de la dissipation de chaleur par le sang et des variations de flux sanguin dans les tissus amènent en revanche à des déviations avec le modèle du fantôme atteignant + 120 %.

La comparaison des dynamiques d'élévation de température calculées numériquement avec le modèle de fantôme homogène et le modèle multicouches de tissus (Figure V.25a), révèle que pour des expositions inférieures à 1000 sec, les élévations de température en surface du fantôme sont comprises dans la gamme de celle du modèle de tissus. Au delà de ces 1000 sec, la dynamique en surface du fantôme devient plus élevée que celle en surface de la structure multicouche avec des déviations après 1 h d'exposition comprises entre + 48 % et + 183 %. La Figure V.25b qui présente les distributions d'élévation de température à $t = 500$ sec, confirme que si le résultat en surface du fantôme est compris dans la gamme de ceux du modèle de tissus multicouches, l'élévation de température est en revanche plus élevée dans le fantôme au delà de 5 mm de profondeur. Cette différence s'explique par la présence de la couche de graisse dans le modèle multicouche qui protège les tissus internes du corps tel que le muscle d'échauffements générés en surface du corps, du fait de sa faible valeur de conductivité thermique qui «bloque» la diffusion de chaleur et donc concentre l'échauffement dans la couche de peau. Expliquant aussi les

échauffements plus élevés en début d'exposition dans le modèle multicouche de tissus pour certaines combinaisons de paramètres que dans le modèle du fantôme homogène.

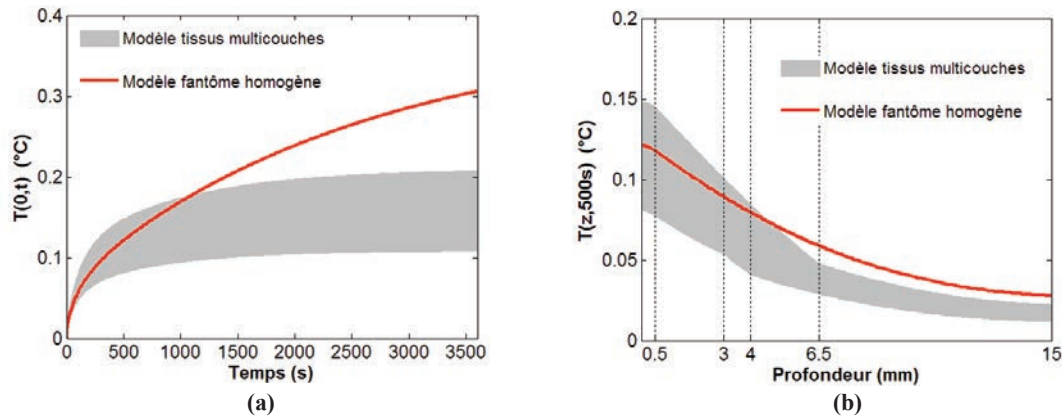


Figure V.25 - Impacts des variations combinées de l'ensemble des paramètres du modèle de tissus multicouches (zones grisées), et comparaison avec les résultats obtenus avec modèle thermique du fantôme équivalent d'épaisseur 15 mm (a) dans le temps à l'interface $z = 0$ mm et (b) suivant la profondeur z du fantôme après 500 sec d'exposition.

Précisons que nous avons cherché à établir un modèle de coefficient correctif permettant de rapprocher les niveaux d'élévations de température obtenues avec le modèle homogène du fantôme de la peau de ceux du modèle de tissus multicouches avec flux sanguin.

5. Conclusion

Un modèle numérique équivalent du modèle analytique du fantôme de la peau humaine à 60 GHz et d'épaisseur finie a été utilisé pour confirmer les résultats calculés analytiquement à partir de l'équation de transfert de chaleur proposée dans le chapitre IV. Les particularités de ce modèle numérique établi avec CST MWS ont été présentées et les équivalences avec les paramètres du modèle analytique ont été données. La comparaison des dynamiques à $z = 0$ et des distributions suivant z à $t = 500$ sec des élévations de température simulées avec le modèle numérique équivalent et de celles calculées avec la solution analytique révèle un très bon accord avec des déviations inférieures à 5 % quelle que soit l'épaisseur du fantôme, les valeurs des coefficients d'échange thermique aux interfaces ou bien la densité de puissance incidente.

Un dispositif de mesure thermo-infrarouge a été mis au point afin de valider expérimentalement le comportement thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz. Dans ce dispositif, un fantôme planaire est exposé au rayonnement d'un guide d'onde ouvert WR-15 alimenté par un générateur haute puissance fournissant un signal continu 60 GHz. Les écarts d'élévation de température en $z = 0$ mm liés aux incertitudes sur certains paramètres du modèle expérimental ont été estimés à l'aide d'un modèle numérique équivalent sous CST MWS. Plusieurs mesures ont été réalisées sur des fantômes d'épaisseurs différentes, au moins trois mesures pour chaque épaisseur, en suivant un même protocole de mesure afin de garantir la reproductibilité des conditions de mesure. L'analyse des résultats expérimentaux a montré une très bonne reproductibilité de mesure quelle que soit l'épaisseur du fantôme avec des écarts-types maximaux compris entre 5 % et 9 %. Cette analyse a aussi mis en avant le bon accord entre les résultats expérimentaux et le modèle numérique, puisque quelle que soit l'épaisseur, les dynamiques d'élévation de température mesurées sont comprises à l'intérieur des zones de confiance numériques établies à partir des incertitudes des paramètres du modèle expérimental. Concernant le comportement thermique du fantôme, l'analyse expérimentale montre que comme pour les modèles analytiques et numériques, les dynamiques d'élévation de température mesurées sont plus élevées en surface des fantômes fins et tendent à converger vers le modèle semi-infini lorsque l'épaisseur du fantôme augmente. Les observations effectuées permettent de valider expérimentalement le comportement thermique du fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz avec épaisseur finie.

Une comparaison numérique du comportement du modèle thermique du fantôme homogène à celui du modèle multicouches de tissus a aussi été menée, afin de mettre en avant les conditions dans lesquelles le fantôme pouvait être un équivalent thermique expérimental du corps humain, en l'absence actuellement d'un fantôme expérimental multicouches en bande millimétrique qui serait à la fois un équivalent diélectrique et thermique des tissus du corps humain. Les spécificités et les propriétés d'un modèle multicouches ont été présentées. Les impacts séparés et combinés de plusieurs paramètres du modèle multicouches tels que les variations des épaisseurs de couches ou les flux sanguin, sur les écarts avec les résultats du modèle de fantôme homogène ont été analysés. Ils révèlent que la dissipation thermique via le sang était la source d'écarts les plus importants avec les élévations de température dans le fantôme après 1 h d'exposition. Cependant, pour des expositions assez courtes (< 1000 sec), la dynamique de température en surface du fantôme est comprise dans les ordres de grandeur de celle sur le modèle multicouches.

6. Références

- [1] N. Chahat, M. Zhadobov, and R. Sauleau, "Broadband Tissue-Equivalent Phantom for BAN Applications at Millimeter Waves," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 7, pp. 2259–2266, Jul. 2012.
- [2] W. J. Ellison, "Permittivity of pure water, at standard atmospheric pressure, over the frequency range 0-25THz and temperature range 0-100°C," *J Phys Chem Ref Data*, vol. 36, no. 1, pp. 1–18, Mar. 2007.
- [3] F. S. Barnes and B. Greenebaum, *Bioengineering and biophysical aspects of electromagnetic fields*. CRC, 2006.
- [4] D. Fiala, K. J. Lomas, and M. Stohrer, "A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system," *J. Appl. Physiol.*, vol. 87, no. 5, pp. 1957–1972, 1999.
- [5] Y. Kurazumi, T. Tsuschikawa, J. Ishii, K. Fukagawa, Y. Yamato, and N. Matsubara, "Radiative and convective heat transfer coefficients of the human body in natural convection," *Build. Environ.*, vol. 43, no. 12, pp. 2142–2153, Dec. 2008.
- [6] E. H. Wissler, "Steady-state temperature distribution in man," *J Appl Physiol*, vol. 16, no. 4, pp. 734–740, Jul. 1961.
- [7] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergma, and A. Lavine, *Principles of Heat and Mass Transfers*, 7th ed. Singapore: John Wiley & Sons, 2013.
- [8] F. A. Duck, *Physical Properties of Tissue: A Comprehensive Reference Book*, Academic Press. Harcourt Brace Jovanovich, 1990.
- [9] S. I. Alekseev and M. C. Ziskin, "Influence of blood flow and millimeter wave exposure on skin temperature in different thermal models," *Bioelectromagnetics*, vol. 30, no. 1, pp. 52–58, Jan. 2009.
- [10] A. Kanezaki, A. Hirata, S. Watanabe, and H. Shirai, "Parameter variation effects on temperature elevation in a steady-state, one-dimensional thermal model for millimeter wave exposure of one- and three-layer human tissue," *Phys. Med. Biol.*, vol. 55, no. 16, pp. 4647–4659, Aug. 2010.
- [11] K. R. Foster, H. N. Kritikos, and H. P. Schwan, "Effect of surface cooling and blood flow on the microwave heating of tissue," *Biomed. Eng. IEEE Trans. On*, no. 3, pp. 313–316, 1978.
- [12] S. Gabriel, R. W. Lau, and C. Gabriel, "The dielectric properties of biological tissues: III. Parametric models for the dielectric spectrum of tissues," *Phys. Med. Biol.*, vol. 41, no. 11, p. 2271, 1996.
- [13] P. A. Hasgall, F. Di Gennaro, C. Baumgartner, E. Neufeld, M. C. Gosselin, D. Payne, A. Klingeböck, and N. Kuster, "Database for thermal and electromagnetic parameters of biological tissues," 2.5, 2014.
- [14] L. Zilberti, A. Arduino, O. Bottauscio, and M. Chiampi, "Parametric analysis of transient skin heating induced by terahertz radiation: Skin Heating by THz Radiation," *Bioelectromagnetics*, vol. 35, no. 5, pp. 314–323, Jul. 2014.
- [15] T. Wu, T. S. Rappaport, and C. M. Collins, "Safe for Generations to Come: Considerations of Safety for Millimeter Waves in Wireless Communications," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 16, no. 2, pp. 65–84, Mar. 2015.

Chapitre VI. Analyse thermique du couplage antennes/corps à 60 GHz

Sommaire

1.	Introduction	189
2.	Antennes sur le fantôme : évaluation numérique	190
2.1.	Modèles	190
2.2.	Impact de la présence du connecteur sur le DAS	192
2.3.	Distinction entre les sources d'échauffement du fantôme équivalent	197
3.	Validation expérimentale.....	203
3.1.	Mesures à l'aide de la caméra infrarouge.....	203
3.2.	Résultats de mesures thermiques.....	205
4.	Analyse dosimétrique et thermique des niveaux d'exposition des réseaux d'antennes....	209
4.1.	Lien avec les normes limites d'exposition en bande millimétrique	209
4.2.	Comparaison entre les tendances électromagnétiques et thermiques	210
4.3.	Analyse et interprétation des résultats thermiques	211
5.	Conclusion.....	213
6.	Références	214

1. Introduction

Pour analyser l'augmentation de la température dans le corps liée au rayonnement d'antennes à 60 GHz, nous nous sommes intéressés à l'échauffement du fantôme équivalent lors des expositions aux différents réseaux d'antennes *off-body* présentés dans les chapitres II et III.

Les résultats présentés dans ce chapitre ont deux objectifs : le premier consiste à valider par mesures thermo-infrarouges les résultats numériques thermiques pour différents réseaux d'antennes *off-body* ; le deuxième consiste à interpréter les résultats dosimétriques et thermiques obtenus numériquement pour le fantôme.

Pour répondre aux objectifs fixés, dans la section 2 de ce chapitre, nous présentons les distributions de DAS et d'élévation de température en surface du fantôme équivalent de la peau humaine en cas d'exposition aux réseaux d'antennes *off-body* obtenus numériquement. Dans la section 3, une validation expérimentale des résultats thermiques par mesure de température à l'aide d'une caméra infrarouge est présentée. Dans la section 4, une analyse comparative et quantitative dosimétrique et thermique des niveaux d'exposition du fantôme aux différents réseaux d'antennes *off-body* est proposée.

Précisons que dans ce chapitre nous présentons uniquement les résultats de simulation et de mesure relatifs aux réseaux d'antennes A_1 , A_2 , A_3 et A_4 .

2. Antennes sur le fantôme : évaluation numérique

2.1. Modèles

L'exposition du fantôme aux rayonnements des réseaux d'antennes *off-body* à 60 GHz est modélisée avec le solveur temporel du module électromagnétique CST MWS. Ce module permet de calculer les distributions de champs électromagnétiques et de DAS dans le fantôme équivalent de la peau. Les distributions calculées sont ensuite utilisées comme source de chaleur dans le module CST Multiphysics, afin d'évaluer les échauffements du fantôme au cours d'une exposition sur une durée d'exposition donnée.

2.1.1. Modèles électromagnétiques

Deux configurations d'exposition du fantôme aux différents réseaux d'antennes sont considérées. Dans la première configuration, l'impact de la présence du connecteur de mesure sur le calcul des distributions de DAS n'est pas pris en compte dans la simulation (Figure VI.1a) contrairement à la seconde configuration (Figure VI.1b) qui est semblable au cas mesuré.

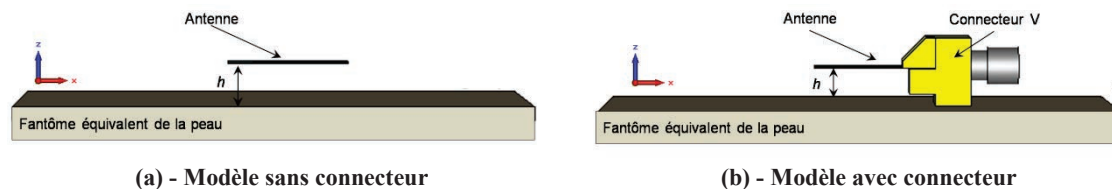


Figure VI.1 - Illustration de la position du réseau d'antennes (a) sans et (b) avec connecteur de mesure sur le fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz, où h est la distance minimale séparant la face arrière du réseau d'antennes de la surface du fantôme égale à 4,5 mm.

Quelle que soit la configuration simulée, les conditions aux frontières de simulation sont définies comme des couches absorbantes parfaites (PML). Le maillage local est utilisé pour mailler finement les éléments des réseaux d'antennes telles que les antennes patch ou bien les arborescences d'alimentation avec un critère de maillage suivant x et y à $\lambda_g/25$. Un maillage local est aussi utilisé pour augmenter la précision des calculs de champs électromagnétiques dans l'épaisseur du fantôme située sous la surface exposée au réseau d'antennes (entre $z = 0$ et $z = 0,5$ mm), avec un critère de maillage suivant z à $\lambda_g/50$. La puissance d'entrée des réseaux d'antennes est définie à 500 mW avant déduction des pertes par désadaptation, cette valeur correspond à la puissance de transmission maximale autorisée sur la bande 60 GHz [1], ce qui nous permet d'évaluer les cas les plus défavorables d'exposition. La présence du corps humain est modélisée par un fantôme équivalent $80 \text{ mm} \times 80 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$. Ce fantôme émule les propriétés électromagnétiques de la peau humaine à 60 GHz, avec une permittivité complexe égale à $\epsilon^* = 7,4 - j 11,4$ et une masse volumique ρ égale à 880 kg/m^3 .

2.1.2. Modèles thermiques

Afin de distinguer les élévations de température en surface du fantôme induites par le rayonnement électromagnétique de celles générées par l'échauffement de la structure antennaire et du connecteur, deux modèles thermiques sont considérés.

1) Un premier modèle constitué uniquement d'un fantôme équivalent (Figure VI.2a) est utilisé pour calculer uniquement l'échauffement induit par le rayonnement des différents réseaux d'antennes *off-body*.

2) Un second modèle dit complet, prenant en compte en plus de fantôme les structures des réseaux d'antennes et du connecteur (Figure VI.2b) est considéré pour estimer le niveau d'échauffement total du fantôme, c'est-à-dire l'élévation de température induite par l'exposition au rayonnement des réseaux d'antennes mais également celle liée à l'échauffement de la structure antennaire et du connecteur.

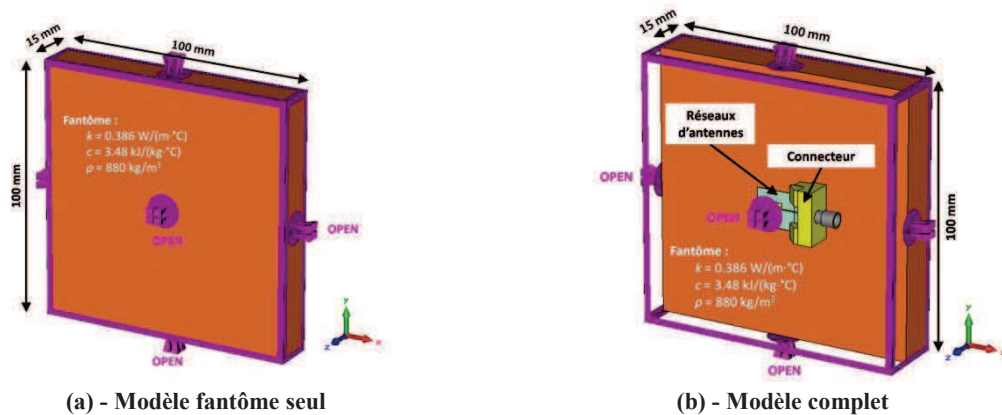


Figure VI.2 - Modèles thermiques simulés : (a) fantôme seul exposé et (b) fantôme en présence du réseau d'antennes et du connecteur.

Dans les deux modèles, un fantôme équivalent de la peau humaine de 100 mm × 100 mm × 15 mm est considéré. Les propriétés thermiques de ce fantôme ainsi que celles des matériaux constitutifs des réseaux d'antennes et du connecteur de mesure dans le cas du modèle *complet* sont détaillées dans le Tableau VI.1. Quel que soit le modèle, les conditions aux frontières de simulation thermique (OPEN) permettent l'écoulement total du flux de chaleur quelle que soit la direction. Des conditions d'échange de chaleur sont également définies pour chaque surface des éléments du modèle en contact avec l'air. Ces conditions d'échange permettent le calcul de la quantité de chaleur échangée par convection et par rayonnement thermique, via les valeurs du coefficient de transfert de chaleur par convection h_c et de l'émissivité e aussi données dans le Tableau VI.1 pour les principaux matériaux du modèle présentant une interface avec l'air.

Tableau VI.1 - Propriétés thermo-physiques [2] et paramètres relatifs aux transferts de chaleur [3] des principaux matériaux des modèles thermiques numériques.

Matériaux		Propriétés thermo-physiques			Transfert de chaleur	
		c (J/(kg·°C))	k (W/(m·°C))	ρ (kg/m³)	h_c (W/(m²·°C))	e
Fantôme		3,48	0,386	880	5	1
Réseau d'antenne	Cuivre	0,39	401	8930	5	0,5
	RT/duroid 5880	0,2	1	2200	5	0,9
Connecteur	Laiton	109	0,38	8500	5	0,5
	Acier	0,48	59,5	7870	5	0,5

2.2. Impact de la présence du connecteur sur le DAS

L'étude dosimétrique présentée dans le chapitre II entre les différents réseaux d'antennes *off-body* ne considère pas l'impact des contraintes de fabrication qui sont analysées dans le chapitre III et notamment les contraintes de connectique.

En effet, pour pouvoir tester et mesurer nos réseaux d'antennes il a été montré dans le chapitre III qu'il était nécessaire de prévoir un allongement appelé languette d'alimentation sur les structures antennaires des réseaux donnant accès à l'arborescence d'alimentation quand celle-ci est enterrée dans le substrat par exemple (Figure VI.3a). De plus, l'utilisation d'un connecteur de mesure est aussi requise. Pour les mesures en bande V, un connecteur V102F de chez Anritsu est utilisé [4]. Ce connecteur est composé de différents éléments assemblés sur un même support dont les dimensions par rapport aux réseaux d'antennes sont importantes (Figure VI.3b) et impactent le diagramme de rayonnement dans le plan où il est présent d'après les résultats de mesure présentés dans le chapitre III.

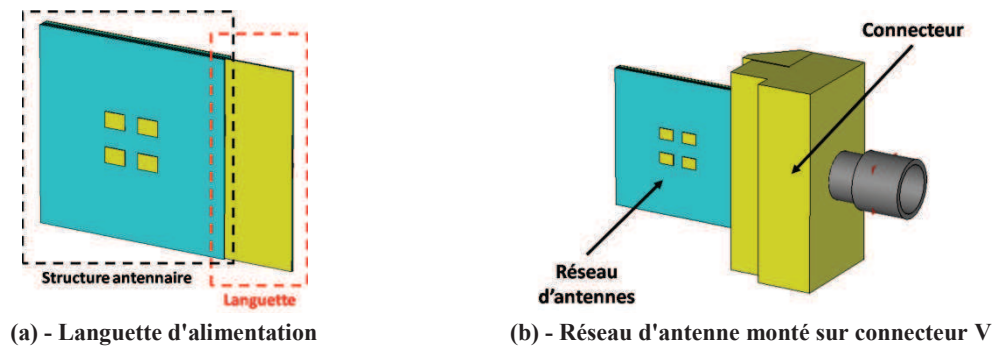


Figure VI.3 - Illustration des contraintes imposées par la connectique de mesure des réseaux d'antenne *off-body*.

Même si ces éléments ne seraient pas présents dans le cas où les réseaux d'antennes seraient intégrés dans une application BAN, il nous est cependant indispensable ici d'en tenir compte dans notre analyse, pour pouvoir comparer les résultats numériques avec les résultats de mesures.

2.2.1. Distributions de DAS sur la surface du fantôme exposée aux réseaux d'antennes

Les distributions de DAS en surface du fantôme données en Figure VI.4 sont induites par les expositions aux réseaux d'antennes A_1 , A_2 , A_3 et A_4 spécifiques à chaque configuration de simulation électromagnétique présentées en Figure VI.1, tenant compte ou pas de la présence du connecteur de mesure. Sur les distributions (Figure VI.4), les positions des réseaux d'antennes et des languettes d'alimentation sont respectivement marquées par un carré et un rectangle rouge, la position du connecteur est elle marquée par une pièce de couleur plus claire.

Dans cette sous-section les distributions relatives à l'exposition de chaque réseau d'antennes sans connecteur (Figure VI.1a) sont analysées et commentées en considérant les modèles de rayonnement présentés en Annexe C. En ce qui concerne les distributions relatives aux réseaux montés sur connecteur (Figure VI.1b), elles sont comparées à celles obtenues sans connecteur.

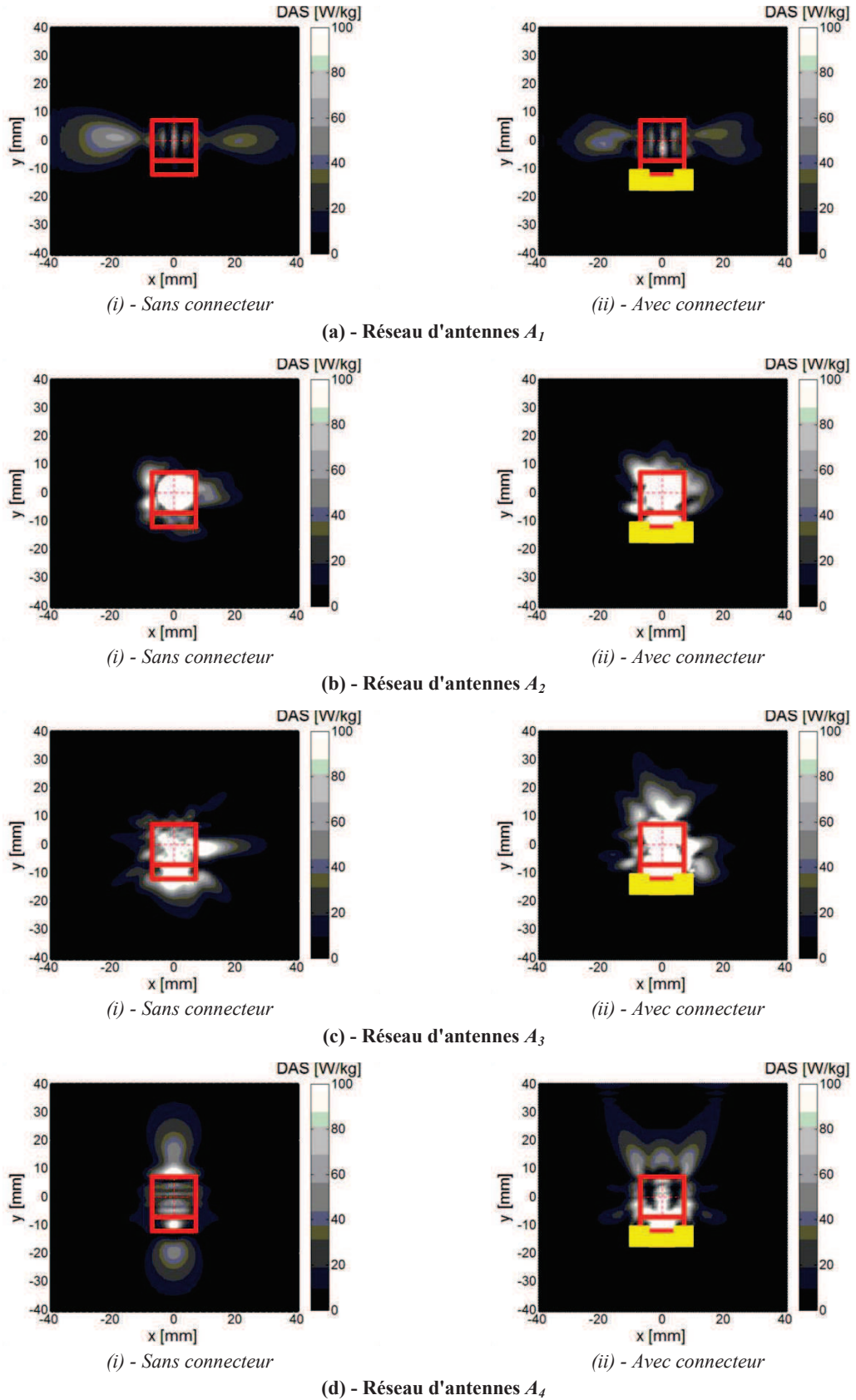


Figure VI.4 - Distributions de DAS à 60 GHz sur la surface du fantôme équivalent obtenues numériquement pour une puissance injectée de $P_i = 500$ mW aux réseaux d'antennes.

▪ Réseau d'antennes A_1

Sur la distribution de DAS induite par l'exposition au réseau d'antennes A_1 sans connecteur présentée en Figure VI.4a(i), les pics de DAS les plus élevés sont répartis de part et d'autre de la structure suivant l'axe x . Ces pics s'expliquent par la présence de lobes secondaires aux niveaux élevés dans le plan E du diagramme de rayonnement (**Annexe C**).

L'analyse de la distribution de DAS en surface du fantôme exposé au réseau d'antennes A_1 monté sur connecteur en Figure VI.4a(ii) montre des similitudes importantes avec la distribution obtenue sans prendre en compte le connecteur dans les simulations. En effet, on observe sur les deux distributions que les pics de DAS les plus élevés sont orientés de part et d'autre de la structure antennaire suivant l'axe x . Quelles que déformations sont cependant à relever autour des positions $x = -20$ et $x = 20$.

▪ Réseau d'antennes A_2

Dans le cas de l'exposition au réseau d'antennes A_2 sans connecteur (Figure VI.4b(i)), les niveaux de DAS les plus élevés sont concentrés sous la structure antennaire. Cette distribution s'explique par un niveau de rayonnement arrière du réseau d'antennes très élevé (**Annexe C**).

La distribution de DAS spécifique au réseau d'antennes A_2 monté sur connecteur présentée en Figure VI.4b(ii) est très proche, comme pour le réseau A_1 , de celle pour laquelle le connecteur est exclu du modèle numérique. Les pics de DAS élevés se trouvent toujours concentrés sur la surface du fantôme localisée sous le réseau d'antennes. Cependant, il est important de souligner que sur la distribution de DAS obtenue pour la configuration de simulation avec connecteur, les niveaux des pics de DAS sont plus marqués sous la languette d'alimentation que sur la distribution obtenue pour le réseau d'antennes seul en présence du fantôme. Cette différence peut s'expliquer par des réflexions sur le support du connecteur, mais aussi par le rayonnement de la partie du connecteur en contact avec la ligne micro-ruban.

▪ Réseau d'antennes A_3

Pour ce réseau d'antennes les pics de DAS les plus élevés sont localisés sous la structure antennaire du réseau A_3 (Figure VI.4c(i)), contrairement aux observations faites dans le chapitre II. Si on analyse plus précisément la distribution, on s'aperçoit que les pics de DAS sont localisés aux abords ou bien sous la languette d'alimentation qui est imposée par les contraintes de connectique. En effet, dans la version optimisée pour le prototypage, la ligne micro-ruban de la languette est placée sur la face arrière de la languette et fait donc face à la surface du fantôme générant un rayonnement en direction de ce dernier.

La comparaison des distributions de DAS obtenue avec le modèle de simulation avec connecteur (Figure VI.4c(ii)), montre que le connecteur de mesure a un impact très important dans le cas du réseau d'antennes A_3 . Les réflexions sur le connecteur modifient fortement l'allure de la distribution de DAS sur les surfaces du fantôme comprises entre $y = -20$ mm et $y = -10$ mm ainsi qu'entre $y = 10$ mm et $y = 20$ mm. En effet, sur la distribution de DAS obtenue sans le connecteur, les niveaux pics de DAS sont élevés dans la première zone et faibles dans la deuxième. Dans le cas de la distribution obtenue avec connecteur c'est l'inverse, les niveaux pics de DAS sont plus élevés entre $y = 10$ mm et $y = 20$ mm.

Réseau d'antennes A_4

L'exposition du fantôme au réseau d'antennes A_4 sans connecteur (Figure VI.4d(i)) génère l'apparition de pics de DAS aux niveaux élevés de part et d'autre de la structure antennaire suivant l'axe y . Ces pics s'expliquent par la présence de lobes secondaires dans le plan E du diagramme de rayonnement (**Annexe C**). Comme pour le réseau d'antennes A_3 , des niveaux de DAS élevés sont aussi remarquables sous la languette d'alimentation et s'expliquent aussi par la présence de la ligne micro-ruban non-isolée du fantôme.

La présence du connecteur de mesure impacte fortement l'allure de la distribution de DAS en surface du fantôme équivalent lors de l'exposition au réseau A_4 comme le montre Figure VI.4d(ii). En effet, sur la distribution obtenue avec le modèle sans connecteur, l'allure de la distribution de DAS est majoritairement liée aux lobes secondaires et les pics de DAS les plus élevés sont donc répartis de part et d'autre de la structure du réseaux suivant l'axe y . L'analyse de la distribution calculée en tenant compte de la présence du connecteur de mesure montre que, les pics de DAS se concentrent alors sous la languette du réseau d'alimentation du fait du rayonnement de la ligne micro-ruban et du connecteur, ainsi que dans la direction y opposée à la position du connecteur.

2.2.2. Quantification de l'impact du connecteur

Les quantités dosimétriques caractéristiques des niveaux d'exposition du fantôme aux différents réseaux d'antennes simulés sans et avec connecteur de mesure sont données en Tableau VI.2. Les niveaux d'exposition sont quantifiés en termes de DAS et de densité de puissance incidente P_0 pics et moyennés sur 1 cm² et 20 cm² en surface du fantôme. Précisons que les valeurs de la densité de puissance incidente sont calculées analytiquement à partir de l'expression analytique $P_0 = \frac{\rho \cdot \delta \cdot DAS}{2 \cdot (1-R)}$ tirée de [5] où ρ est la masse volumique du fantôme (880 kg/m³), δ est la profondeur de pénétration (0,45 mm) et R le coefficient de réflexion en surface du fantôme (0,38) à 60 GHz.

L'analyse du Tableau VI.2 montre que les valeurs de DAS et de P_0 avec ou sans connecteur sont très différentes d'un réseau d'antennes à l'autre pour des puissances acceptées équivalentes.

Comme attendu l'absence de plan de masse arrière sur la structure du réseau d'antennes A_2 entraîne des valeurs dosimétriques élevées. Dans le cas où le connecteur de mesure n'est pas pris en compte dans les simulations, les valeurs pics sont multipliées par un facteur compris entre environ 9 et 90 lorsqu'il n'y a pas de plan de masse en face arrière de la structure. Les augmentations des valeurs moyennées sur 1 cm² sont elles moins importantes avec un facteur multiplicateur compris entre 6 et 60. La languette d'alimentation est également très impactant sur les niveaux d'exposition dans le cas où la ligne micro-ruban de la languette rayonne en direction du fantôme. L'analyse des valeurs entre les réseaux A_3 et A_4 qui présentent ce type de languette, et le réseau A_1 où la ligne micro-ruban de la languette rayonne dans la direction opposée au fantôme, révèle un rapport compris entre 2 et 10 pour les valeurs pics et les valeurs moyennées sur 1 cm² calculées avec des modèles sans connecteur. En cas d'analyse sur une surface plus importante (20 cm²), l'augmentation des valeurs de DAS et de P_0 est plus modérée avec un facteur multiplicatif compris entre 1,5 et 3,5.

La comparaison des valeurs dosimétriques obtenues à partir du modèle avec connecteur à celles obtenues avec le modèle sans connecteur montre que la présence du connecteur accroît le niveau d'exposition du fantôme. En effet, en ce qui concerne les valeurs numériques pic de DAS ou bien de P_0 , la présence du connecteur induit une augmentation par un facteur compris entre 1,1

et 16. C'est pour les réseaux d'antennes A_3 et A_4 que l'augmentation du niveau d'exposition est la plus marquée avec une augmentation respective par 6 et par 16. En ce qui concerne les valeurs dosimétriques moyennées les augmentations sont moins importantes avec un facteur compris seulement entre 1 et 4 pour les valeurs moyennes sur 1 cm².

Tableau VI.2 - Valeurs dosimétriques caractéristiques de l'exposition du fantôme équivalent à 60 GHz aux différents réseaux d'antennes *off-body*.

Connecteur	P _a [★] (mW)	DAS (W/kg)			P ₀ (mW/cm²)			P _{abs} [★] (mW)	
		Pic [■]	1 cm² [◆]	20 cm² [●]	Pic	1 cm²	20 cm²		
A ₁	sans	480	72	24,5	9,1	2,3	0,78	0,29	10 (2.0 %)
	avec	499	105	28,5	8,8	3,3	0,91	0,28	8 (1,6%)
A ₂	sans	495	6577	1499,4	90,2	210,0	47,89	2,88	49 (9,8 %)
	avec	499	7211	1702,5	114,8	230.3	54,38	3,67	61 (12,2%)
A ₃	sans	491	721	239,9	33,4	23,0	7,66	1,07	19 (3,9 %)
	avec	485	4553	750,4	80,6	145,4	23,95	2,57	39 (8%)
A ₄	sans	496	152	53,8	13,6	4,8	1,72	0,43	11 (2,2 %)
	avec	494	2458	233,6	25,1	7,5	7,46	0,80	15 (3%)

*Puissance injectée acceptée désignant la puissance injectée (500 mW) après déduction des pertes par réflexion

■ Valeur pic en surface du fantôme

◆ Valeur moyennée sur une surface de 1 cm² autour de la position du pic

● Valeur moyennée sur une surface de 20 cm² autour de la position du pic

*Puissance absorbée par le fantôme

2.3. Distinction entre les sources d'échauffement du fantôme équivalent

Dans le cadre des scénarios de communications centrés sur le corps la durée typique de communication devrait être de quelques dizaines de secondes voir quelques minutes. Dans cette sous-section nous nous intéressons aux distributions et aux niveaux d'élévation de température numériques induits à la surface du fantôme équivalent de la peau à 60 GHz lors d'expositions de 30 sec aux différents réseaux d'antennes.

Les distributions de température obtenues pour les deux configurations de simulation thermique présentées en Figure VI.5 sont analysées et comparées afin distinguer et de quantifier la contribution thermique apportée par le rayonnement électromagnétique du réseau d'antennes de celle liée à l'échauffement du réseau et du connecteur sur l'élévation de température globale en surface du fantôme. Les élévations de température à la surface du fantôme équivalent générées uniquement par le rayonnement des réseaux d'antennes *off-body* sont estimées avec le modèle thermique du fantôme seul (Figure VI.1a), l'élévation de température globale en surface du fantôme est calculée à partir du modèle thermique complet (Figure VI.1b).

2.3.1. Distribution d'élévation de température sur la surface du fantôme exposé aux réseaux d'antennes

Les distributions d'élévation de température en surface du fantôme équivalent obtenues avec les deux modèles numériques présentés en Figure VI.1 pour les quatre réseaux d'antennes A_1 , A_2 , A_3 et A_4 après 30 sec d'exposition sont présentées en Figure VI.5.

Dans les paragraphes qui suivent les allures des distributions obtenues avec le modèle du fantôme seul sont analysées et comparées aux distributions de DAS, puis elles sont ensuite comparées à celles obtenues avec le modèle dit complet.

▪ Réseau d'antennes A_1

L'analyse de la Figure VI.5a (i) montre que les élévations de température générées à la surface du fantôme équivalent par le réseau d'antennes A_1 sont plus importantes sur la zone comprise entre $x = -25$ mm et $x = +25$ mm et entre $y = -10$ mm et $y = +10$ mm. Comme pour la distribution de DAS du réseau d'antennes en Figure VI.4a(ii), les pics de température sont d'autant plus élevés de part et d'autre de la structure antenne marquée par un carré rouge. On ne distingue pas d'échauffement sous la languette ni autour de connecteur de mesure dont la position est aussi repérée sur la distribution.

La distribution d'élévation de température obtenue avec le modèle tenant compte du connecteur (Figure VI.5a (ii)) montre deux différences majeures par rapport à celle en Figure VI.5a (i). En effet, si sur la Figure VI.5a (ii) les élévations de température sont toujours élevées de part et d'autre de la structure antenne suivant l'axe x , on note aussi que l'échauffement principal se situe sous et autour du connecteur, ainsi que sous la structure du réseau d'antenne. L'échauffement observé au niveau du connecteur s'explique par les échanges thermiques entre le support du connecteur et le fantôme par conduction thermique. Celui sous la structure antenne peut être justifié par les transferts de chaleurs convectifs et/ou radiatifs entre la face arrière de la structure et la surface exposée du fantôme.

▪ Réseau d'antennes A_2

La distribution d'élévation de température présentée en Figure VI.5b (i), montre que dans le cas du réseau d'antennes A_2 , l'échauffement se concentre sous la structure antenne marquée par le carré rouge comme pour la distribution de DAS présentée en Figure VI.4b(ii). On distingue également que la surface du fantôme située sous la languette d'alimentation subie un échauffement. Cet échauffement est lié à la fois aux réflexions du rayonnement du réseau d'antennes mais aussi au rayonnement de la partie du connecteur en contact avec la ligne micro-ruban. En revanche, comme pour le réseau A_1 , on n'observe pas d'augmentation de l'élévation de température sur la surface du fantôme située autour de la position du connecteur.

Dans le cas où la présence du connecteur est prise en compte, la distribution d'élévation de température obtenue numériquement avec le modèle (Figure VI.5b (ii)), est comparée avec celle obtenue pour le modèle thermique du fantôme seul, montre un changement important en termes de forme de la distribution. Ce changement se situe au niveau de la surface du fantôme en contact avec le connecteur. La forme de l'échauffement sous la structure du réseau d'antennes est elle en revanche inchangée. Précisons qu'en raison de la normalisation d'échelle, l'élévation de température induite sous la structure par l'échauffement du réseau d'antennes n'est pas remarquable sur la distribution.

▪ Réseau d'antennes A_3

Dans le cas du réseau d'antennes A_3 , la distribution d'élévation de température obtenue pour le réseau d'antennes A_3 avec le modèle thermique du fantôme seul (Figure VI.5c (i)) est comme dans le cas de celle du DAS (Figure VI.4c(ii)) concentrée sous la structure antenne et la languette d'alimentation. Comme pour la distribution de DAS, on distingue également sur la distribution de température une zone d'échauffement dans le prolongement du réseau d'antennes dans la direction $+y$ opposée à la position du connecteur.

La distribution de température calculée avec le modèle complet est présentée en Figure VI.5c (ii). Là encore, l'échauffement se concentre sous la structure du réseau d'antennes, et la forme de la distribution est équivalente. Semblablement aux distributions relatives aux réseaux d'antennes A_1 et A_2 , on distingue également un échauffement de la surface du fantôme au niveau de la zone en contact avec le connecteur dû aux transferts de chaleur par conduction entre le support de connecteur et le fantôme.

▪ Réseau d'antennes A_4

L'échauffement en surface du fantôme induit par le rayonnement du réseau d'antennes A_4 est calculé numériquement à partir du modèle thermique du fantôme seul et la distribution en surface du fantôme est présentée en Figure VI.5d (i). La zone de la surface principalement affectée par l'échauffement se situe sous la languette d'alimentation, comme sur la distribution de DAS présentée (Figure VI.4d(ii)). De plus, un échauffement marqué en forme de croissant est également observé dans la direction $+y$ opposée à la position du connecteur.

Comme pour les distributions des réseaux d'antennes précédentes, la comparaison entre la distribution d'élévation de température obtenue avec le modèle thermique complet (Figure VI.5d (ii)) et celui du fantôme seul (Figure VI.5d (i)) met en avant les élévations de température au niveau de la surface du fantôme en contact avec le connecteur. Sur Figure VI.5d (ii) on remarque un échauffement prononcé sous la structure du réseau d'antenne n'ont perceptible sur Figure VI.5d

(i). Ces pics d'élévation de température peuvent être expliqués par l'échauffement de la structure guide d'onde de l'antenne au cours de l'exposition.

▪ **Bilan**

Comme attendu en raison de la relation de proportionnalité entre le DAS dans un tissu et l'élévation de température générée par l'exposition électromagnétique pour des temps d'exposition très courts $DAS = c \cdot \frac{dT}{dt} \Big|_{t \rightarrow 0}$, les distributions de température en surface du fantôme après 30 sec d'exposition aux différents réseaux sont semblables aux allures des distributions de DAS.

L'analyse et la comparaison des distributions obtenues avec le modèle thermique complet à celles obtenues avec le modèle thermique uniquement composé du fantôme, ont permis de mettre en évidence l'impact de l'échauffement de la structure du réseau d'antenne et du connecteur sur les allures des distributions de température. Quel que soit le réseau d'antennes, l'échauffement induit par le connecteur est visible sur les distributions. En revanche, l'impact de l'échauffement de la structure antennaire sur les élévations de température est seulement visible pour les réseaux A_1 et A_4 du fait de la normalisation choisie sur les figures.

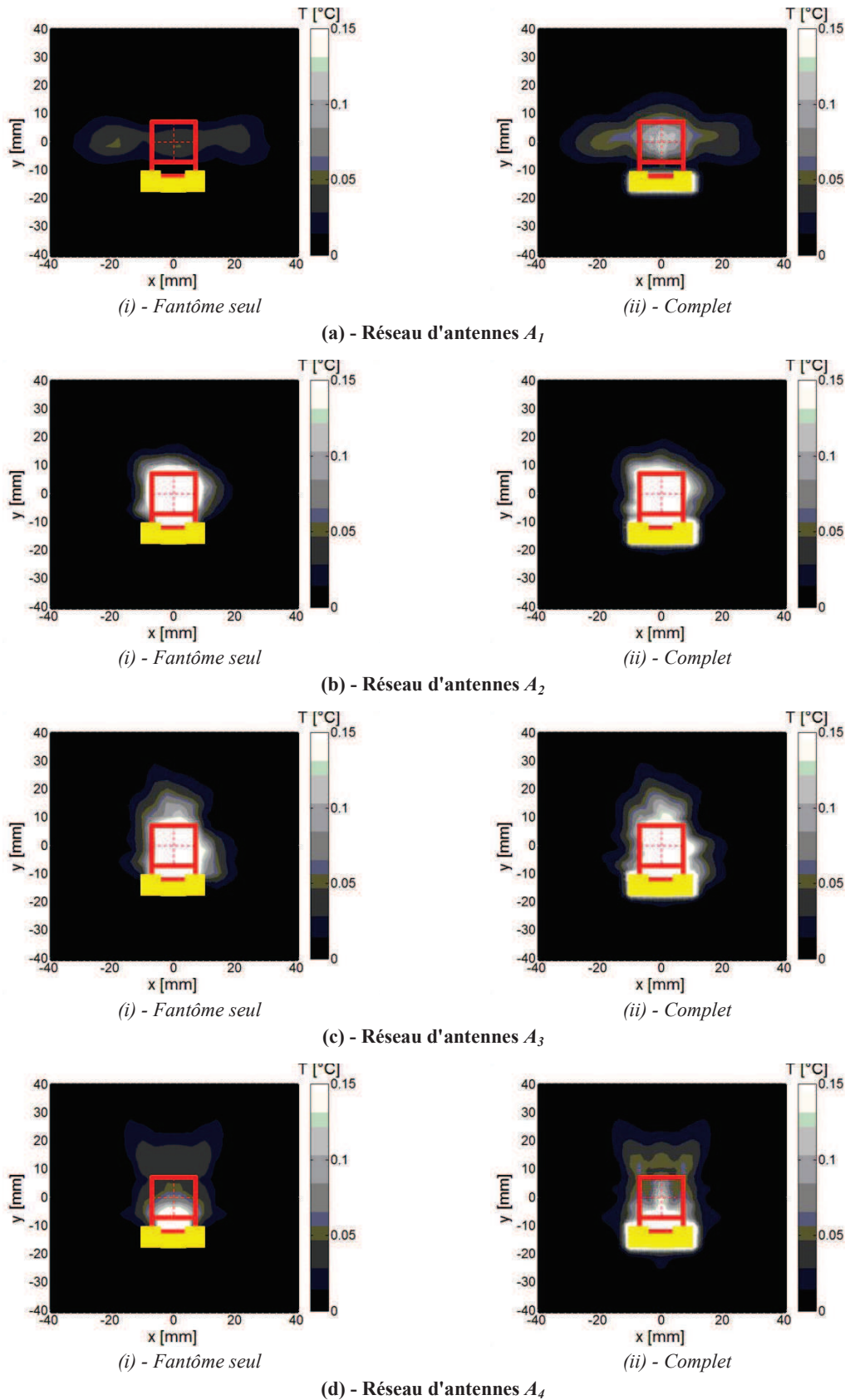


Figure VI.5 - Distributions des élévations de température en surface du fantôme équivalent après 30 sec d'exposition ($P_i = 500$ mW) obtenues avec le modèle thermique (i) du fantôme seul et (ii) celui dit complet (fantôme + réseau + connecteur).

2.3.2. Quantification de la proportion de l'échauffement à imputer au rayonnement électromagnétique

Les températures caractéristiques pics et moyennes des échauffements calculés numériquement avec le modèle thermique du fantôme seul et le modèle dit complet pour les expositions des différents réseaux d'antennes à la surface du fantôme équivalent sont données dans le Tableau VI.3.

Tableau VI.3 - Elévations de température caractéristiques à 30 sec du fantôme équivalent en cas d'exposition à 60 GHz aux différents réseaux d'antennes *off-body*.

Modèles		Elévation de température (°C)			
		T_{pic}^{\star}	$T_{1cm^2}^{\diamond}$	$T_{20cm^2}^{\bullet}$	$T_{volume}^{\blacksquare}$
A_1	fantôme simple	0,05	0,04	0,0065	0,0005
	complet	0,16	0,12	0,0359	0,0011
A_2	fantôme simple	3,00	1,91	0,1534	0,0037
	complet	5,89	2,06	0,1788	0,0043
A_3	fantôme simple	1,57	0,63	0,0885	0,0023
	complet	2,64	0,80	0,1143	0,0029
A_4	fantôme simple	0,49	0,21	0,0278	0,0009
	complet	0,64	0,34	0,0651	0,0016

\star Elévation de température crête en surface du fantôme

\diamond Elévations de température moyennées sur 1cm² en surface du fantôme autour de la position de température T_{pic}

\bullet Elévations de température moyennées sur 20 cm² en surface du fantôme autour de la position de température T_{pic}

\blacksquare Elévations de température moyennées sur le volume total du fantôme (100 mm × 100 mm × 15 mm)

Pour chaque réseau d'antennes, les valeurs obtenues avec le modèle du fantôme seul sont analysées et comparées à celles du modèle complet afin de quantifier l'impact de la présence d'antennes sur les distributions de la température.

Dans le cas du réseau d'antennes A_1 , l'élévation de température pic calculée en surface du fantôme avec le modèle complet est située dans la zone où est positionné le connecteur (Figure VI.5a(ii)). Le transfert de chaleur du connecteur vers le fantôme peut induire une élévation de température de ce dernier allant jusqu'à 0,16 °C. L'élévation de température sous le réseau, générée par l'échauffement de la structure antenne atteinte elle environ 0,12 °C. Si on compare à la valeur d'élévation de température obtenue avec le modèle du fantôme seul liées uniquement à l'exposition au rayonnement qui est égale à 0,05 °C, la proportion de l'échauffement à imputer au rayonnement électromagnétique représente au maximum 31 % à 41 % de la valeur de la température pic totale.

Le pic de température induit en surface du fantôme équivalent exposé au réseau d'antennes A_2 , se situe sous la structure antenne et cela, quel que soit le modèle thermique simulé (fantôme seul ou complet). La valeur du pic de température relevée dans le cas où seul le fantôme est simulé est de 3,00 °C, dans le cas du modèle complet cette valeur passe à 5,89 °C. Le pic de température en surface du fantôme est donc pratiquement doublée (+96 %) par l'effet de l'échauffement de la structure antenne et plus particulièrement par celui des lignes micro-ruban de l'arborescence qui sont gravées sur la face arrière de la structure. L'échauffement généré par le connecteur est lui en revanche plus modéré, avec une élévation de température maximale sur la surface du fantôme de l'ordre de 0,25 °C.

Les élévations de température maximales relevées pour les réseaux d'antennes A_3 et A_4 se situent sur la surface du fantôme sous la languette d'alimentation. Pour le réseau A_3 , la valeur de

l'élévation de température pic obtenue en surface avec le modèle thermique composé uniquement du fantôme est de 1,57 °C, cette valeur augmente de 1,07 °C soit environ 70 % pour le résultat obtenu avec le modèle complet. Dans le cas du réseau A_4 l'augmentation constatée est seulement de l'ordre de 30 %, en effet la valeur pic d'élévation de température passe de 0,49 °C à 0,64 °C. Dans ces deux cas, c'est l'échauffement de la structure antenne et particulièrement de la transition d'alimentation qui induit une élévation supplémentaire des températures en surface du fantôme équivalent. L'échauffement du connecteur contribue lui à une élévation de température maximale de 0,25 °C.

3. Validation expérimentale

Afin de valider les résultats numériques présentés dans la section précédente, une étude expérimentale a été menée à l'aide de la thermométrie infrarouge.

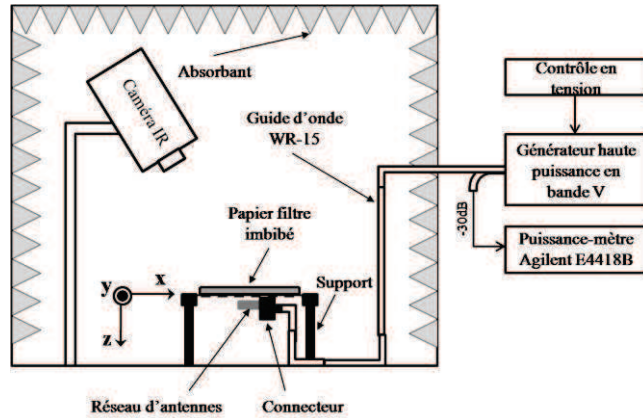
L'analyse des résultats thermiques présentés en section 2 a montré deux considérations majeures à prendre en compte pour définir la stratégie de mesure. La première est que, dans le cas du réseau A_1 les niveaux d'échauffement induits par le rayonnement du réseau sont très faibles à 30 sec. En effet, la valeur de l'élévation de température pic en surface du fantôme est de seulement 0,05 °C dans le cas où l'échauffement du connecteur et de la structure antenne ne sont pas pris en compte. Une telle élévation de température est difficilement détectable par mesure avec la caméra infrarouge. La deuxième est que, quel que soit le réseau d'antennes considéré, les pics de température aux niveaux les plus élevés sont situés sur la surface du fantôme équivalent sous les structures antennaires. En raison de ces deux phénomènes, deux dispositifs de mesure différents ont été imaginés afin de valider expérimentalement les allures des distributions d'élévations de température numériques en surface du fantôme.

Dans les sous-sections qui suivent, les dispositifs de mesures utilisés pour la validation expérimentale sont présentés. Les allures des distributions des élévations de température mesurées après 30 sec d'exposition pour chaque dispositif sont comparées à celles simulées avec des modèles électromagnétiques et thermiques équivalents aux dispositifs de mesure.

3.1. Mesures à l'aide de la caméra infrarouge

Dans cette sous-section deux protocoles de mesure sont présentés. Dans le premier dispositif, l'élément exposé n'est pas un fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz, mais un papier filtre imbibé d'eau [6]. Le papier filtre à l'avantage d'être extrêmement fin, permettant d'augmenter les niveaux de contraste entre les gradients de température des distributions, car l'échauffement sur papier filtre est plus important que sur fantôme pour une exposition équivalente. Cette caractéristique d'épaisseur du papier filtre permet aussi d'envisager des mesures de l'élévation de la température sur la face opposée à l'exposition, permettant d'effectuer une mesure complète de la distribution d'élévation de température. Dans le second dispositif, c'est un fantôme de la peau qui est exposé. Les mesures d'échauffement sur fantôme doivent permettre de quantifier les niveaux d'élévations de température et de les comparer aux niveaux obtenus numériquement.

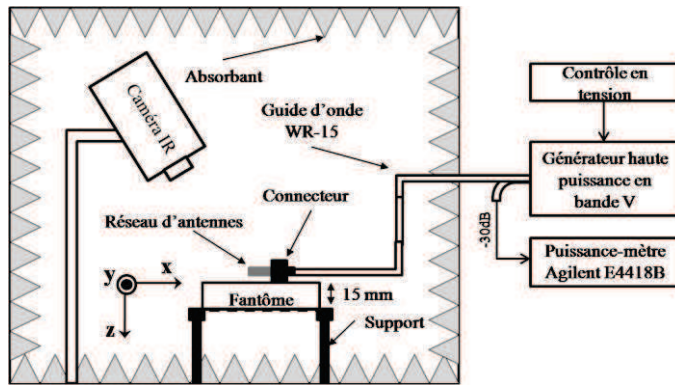
Les dispositifs de mesure utilisant le papier filtre ou bien le fantôme de la peau pour évaluer l'élévation de température induite par l'exposition et l'échauffement du réseau d'antennes sont présentés en Figure VI.6.



(i) - Représentation schématique



(ii) - Photographie du dispositif



(i) - Représentation schématique



(ii) - Photographie du dispositif

Figure VI.6 - Descriptif des dispositifs expérimentaux de mesure (a) sur papier filtre et (b) sur fantôme.

Dans le dispositif de mesure avec le papier filtre, nous utilisons une feuille de papier carrée de dimension 100 mm et d'épaisseur 0,18 mm imbibée d'eau déionisée et emballée dans un fin film plastique afin d'éviter l'évaporation de l'eau. Une fois imbibée et emballée l'épaisseur du papier filtre est estimée à 0,20 mm. Dans le cas du dispositif de mesure utilisant le fantôme de la peau, c'est un élément de forme parallélépipédique de dimension 100 mm et d'épaisseur 15 mm qui est utilisés. Dans les deux dispositifs le papier filtre ou bien le fantôme sont maintenus suspendu dans l'air sur un support PVC évidé et placé dans une chambre anéchoïque compacte (710 mm \times 470 mm \times 770 mm) dont les parois internes sont recouvertes de 15 mm de matériau absorbant. L'exposition est induite par le réseau d'antennes monté sur le connecteur V placé en-dessous du papier filtre (Figure VI.6a) ou bien au dessus du fantôme (Figure VI.6b), précisons que la base du connecteur est en contact avec la surface de l'élément exposé. Le connecteur est relié à un guide d'onde via une transition guide/coaxial qui permet l'alimentation par un générateur haute puissance sur la bande 58,5-61,5 GHz générant un signal CW à 60 GHz. Durant la période d'exposition, la puissance en sortie du générateur est vérifiée via un coupleur -30 dB relié à un puissance-mètre Agilent E4418B (la puissance délivrée par le générateur est fixée à $P_{in} = 500$ mW). La distribution de température sur la face supérieure du papier filtre est mesurée en utilisant une caméra infrarouge haute résolution FLIR SC5000 opérant sur la gamme 2,5-5 μ m dont la résolution est de $\pm 0,025$ °C. La vitesse d'enregistrement de la caméra a été imposée à 5 images/seconde.

Le dispositif de mesure avec papier filtre (Figure VI.6a) permet enregistrer la distribution d'élévation de température en surface, permettant ainsi d'obtenir la distribution et le niveau de l'élévation de température induite sous la structure antenne et sous le connecteur de mesure. En revanche le dispositif avec le fantôme mesure la distribution d'élévation de température sur la face exposée du fantôme, du fait de la présence du connecteur et de réseaux d'antennes entre la lentille de la caméra et la surface du fantôme exposé, ce dispositif permet de mesurer uniquement les allures et les niveaux d'échauffement sur les surfaces du fantôme entourant la structure antenne et sous le connecteur de mesure.

Pour valider expérimentalement les allures des distributions numériques d'élévation de température, des mesures de 300 sec de température ont été répétées plusieurs fois pour chaque réseau d'antennes A_1 , A_2 , A_3 et A_4 monté sur connecteur. Entre chaque mesure, une période de repos de 15 min est imposée, permettant le refroidissement du papier filtre ou bien du fantôme ainsi que du réseau d'antennes et du connecteur de mesure.

3.2. Résultats de mesures thermiques

Dans cette sous-section, les résultats obtenus expérimentalement par mesure avec les deux dispositifs expérimentaux (sur papier filtre et sur fantôme) détaillés en sous-section 3.1, sont comparés aux résultats numériques calculés par co-simulation électromagnétiques et thermiques sous CST MWS. Dans le cas du fantôme, les résultats numériques utilisés pour la comparaison des élévations de température sont ceux obtenus avec le modèle électromagnétique avec connecteur (Figure VI.1b) et avec le modèle thermique dit complet (Figure VI.2b). Pour obtenir les résultats numériques spécifiques à l'exposition du papier filtre les modèles utilisés sont identiques à ceux du fantôme, sauf que l'épaisseur est fixée à 0,20 mm que ce soit dans le modèle électromagnétique ou bien thermique.

Les distributions d'élévation de température simulées (i) et mesurées (ii) obtenues après 30 sec d'exposition du papier filtre imbibé (Figure VI.7) ou bien du fantôme (Figure VI.8) aux réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz montés sur connecteur de mesure sont analysées et comparées dans les paragraphes qui suivent.

▪ Réseau d'antennes A_1

La comparaison des distributions d'élévation de température numériques et expérimentales sur papier filtre respectivement présentées en Figure VI.7a (i) et Figure VI.7a (ii) révèle un bon accord en terme d'allure. En effet, sur les deux figures, des élévations de température plus marquées sur la surface du papier filtre centrée sous la structure du réseau d'antennes A_1 sont observables.

L'analyse comparative des distributions d'élévation de température numériques et expérimentales sur fantôme est effectuée à partir de Figure VI.8a (i) et de Figure VI.8a (ii). Comme attendu avec cette configuration, il n'est pas possible de vérifier expérimentalement la forme de la distribution sous la structure antenne et le connecteur de mesure. En revanche, la comparaison montre que les allures d'échauffement induites par le rayonnement des lobes secondaires sont discernées sur la distribution mesurée suivant l'axe x .

▪ Réseau d'antennes A_2

Les distributions d'élévation de température numériques et expérimentales en surface du papier filtre obtenues en cas d'exposition au réseau d'antennes A_2 sont données en Figure VI.7b (i) et Figure VI.7b (ii). La comparaison de ces deux figures révèle un bon accord entre simulation et mesure. En effet, dans les deux cas les élévations de température les plus élevées sont principalement situées sous la structure antennaire et sous la languette d'alimentation.

En ce qui concerne les distributions en surface du fantôme équivalent présentées en Figure VI.8b (i) et Figure VI.8b (ii), leur comparaison semble aussi montrer que les pics d'élévation de température sont centrés sous la structure antennaire. L'analyse montre que les échauffements en surface du fantôme autour du réseau d'antennes sont semblables.

▪ Réseau d'antennes A_3

Les Figure VI.7c (i) et Figure VI.7c (ii) présentent les distributions des élévations de température induites en surface du papier filtre après 30 sec d'exposition au réseau d'antennes A_3 . Sur les deux figures l'échauffement est localisé sous la structure antennaire ainsi que sous la languette d'alimentation, et il a également tendance à impacter la surface du fantôme dans la direction y opposée à celle du connecteur de mesure.

La comparaison des distributions en surface du fantôme équivalent données en Figure VI.8c (i) et Figure VI.8c (ii), montre que dans le cas numérique ou bien expérimental, un échauffement marqué de la surface du fantôme suivant l'axe y opposée à la position du connecteur. Dans le cas expérimental, les niveaux d'élévation sont plus élevés que dans le cas numérique.

▪ Réseau d'antennes A_4

Les élévations de température en surface du papier filtre dans le cas d'une exposition au réseau d'antennes A_4 sont plus élevées sous la languette d'alimentation du réseau d'antennes comme on peut le voir avec Figure VI.7d (i) et Figure VI.7d (ii). Les niveaux d'élévation de température au delà de cette partie de la surface du papier filtre sont beaucoup moins marqués.

Pour la distribution expérimentale mesurée sur fantôme présenté en Figure VI.8d (i), il est très difficile de faire le lien avec l'allure numérique Figure VI.8d (ii), du faite que les niveaux d'élévation de température majeurs sont très concentrés sous la structure et non visibles sur les surfaces du fantôme entourant le réseau d'antennes.

▪ Bilan

De manière générale pour les mesures réalisées sur papier filtre, les allures des distributions d'élévation de température sont conformes aux attentes numériques. En effet, quels que soit les réseaux d'antennes les localisations des pics de température mesurés correspondent aux localisations déterminées numériquement.

En ce qui concerne les mesures réalisées sur fantôme les conclusions sont moins évidentes du faite que pour trois des quatre réseaux d'antennes, les niveaux d'élévation de température les plus remarquables sont situés sous les structures antennaires. Cependant en ce qui concerne le réseau A_1 , des allures d'échauffement pouvant être liées aux lobes secondaires de rayonnement sont identifiables de part et d'autre de la structure du réseau.

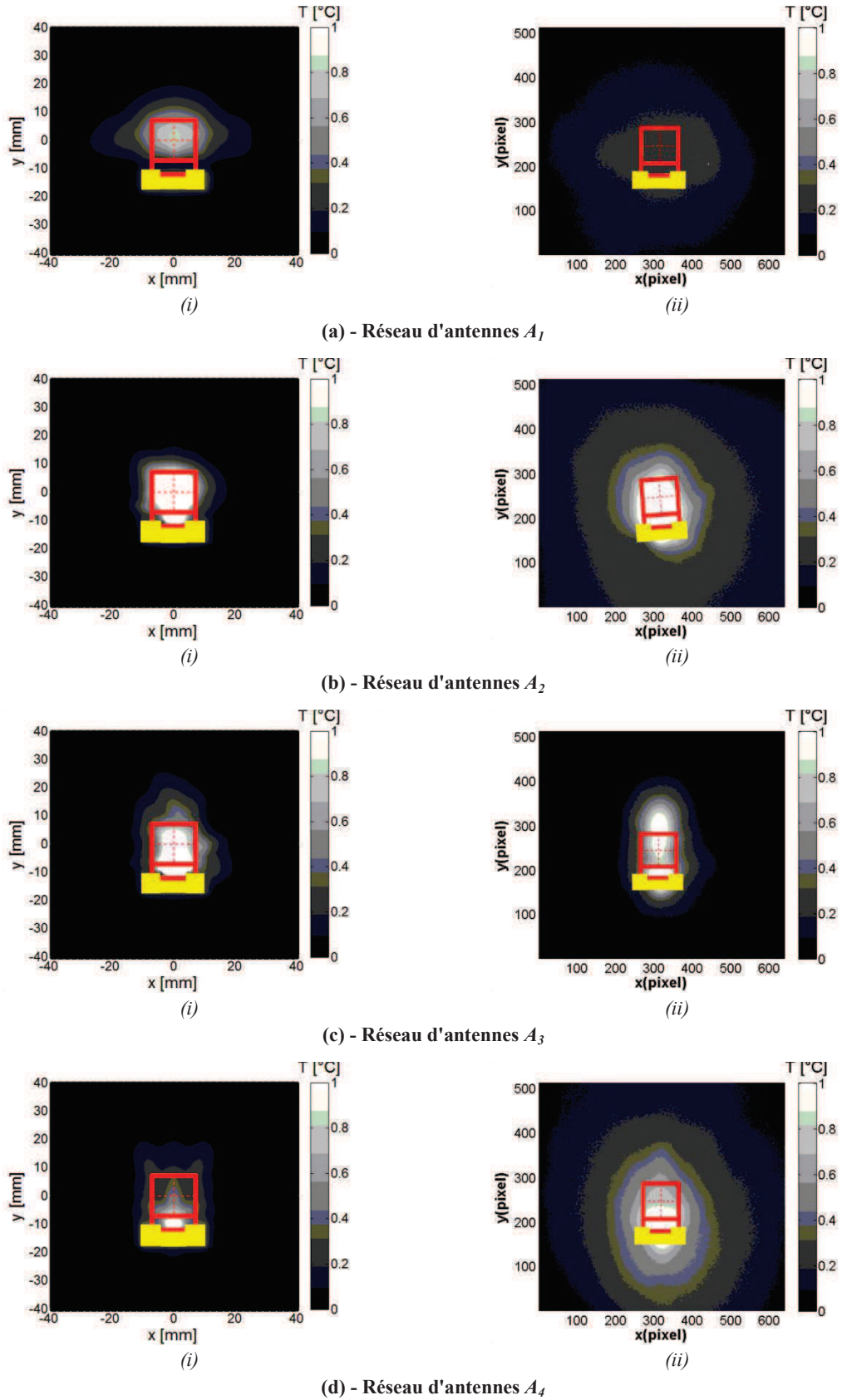


Figure VI.7 - Distributions (i) numériques et (ii) expérimentales des élévations de température en surface du papier filtre imbibé d'eau après 30 sec d'exposition aux réseaux d'antennes *off-body* montés sur connecteur ($P_i = 500$ mW).

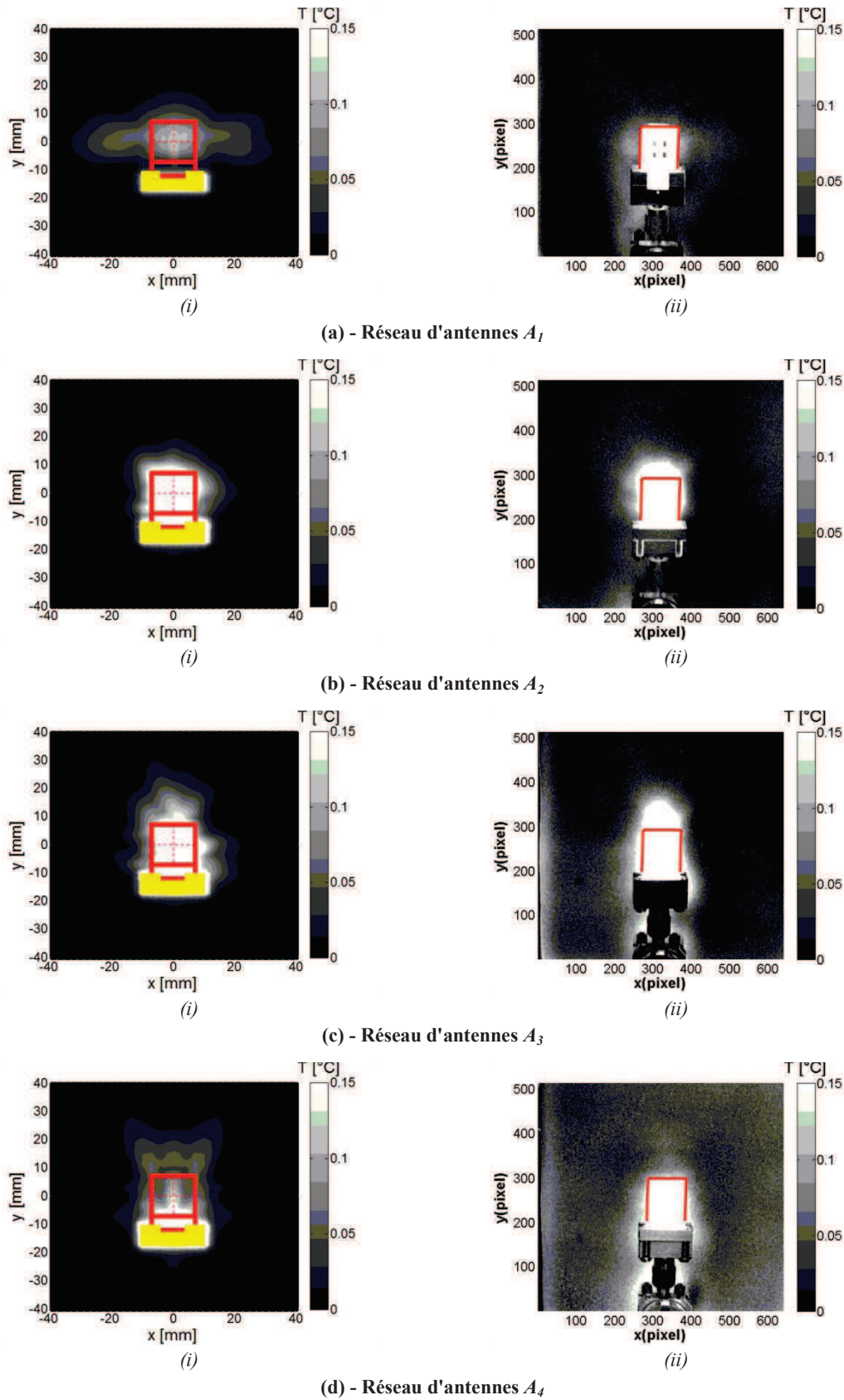


Figure VI.8 - Distributions (i) numériques et (ii) expérimentales des élévations de température en surface du fantôme équivalent après 30 sec d'exposition aux réseaux d'antennes *off-body* montés sur connecteur ($P_i = 500$ mW).

4. Analyse dosimétrique et thermique des niveaux d'exposition des réseaux d'antennes

4.1. Lien avec les normes limites d'exposition en bande millimétrique

Dans cette sous-section, nous comparons les niveaux de densité de puissance incidente P_0 et de température à 30 sec obtenus numériquement pour les différents réseaux d'antennes avec les limites d'expositions établies par l'ICNIRP [7] dans les environnements professionnels contrôlés et grands publics.

4.1.1. Densité de puissance incidente

Dans les paragraphes qui suivent nous comparons les valeurs d'exposition des différents réseaux d'antennes en termes de densité de puissance incidente calculée avec le modèle électromagnétique en tenant compte de la présence du connecteur (Figure VI.1b) pour une puissance injectée de 500 mW équivalente à la puissance maximale autorisée pour les antennes en bande 60 GHz [1].

L'analyse de Tableau VI.4 montre que l'exposition générée par les réseaux d'antennes *off-body*, est inférieure quel que soit le type de réseaux aux valeurs limites moyennées sur 1 cm² et sur 20 cm² recommandées par l'ICNIRP dans les environnements professionnels contrôlés.

Contrairement au cas des environnements contrôlés, le niveau de certains des réseaux d'antennes lorsqu'une puissance P_{in} de 500 mW est injectée, dépasse les recommandations fixées pour les expositions grand public. C'est le cas des réseaux A_2 et A_3 . Le niveau d'exposition du réseau A_2 pour P_{in} est multiplié par un facteur de l'ordre de 3 par rapport à la limite fixée par l'ICNIRP pour une valeur moyenne sur 1 cm² et sur 20 cm². Le niveau du réseau A_3 est lui 20 % supérieur à la valeur limite moyenne sur 1 cm² et de 7 % lorsque la surface est de 20 cm². Précisons que pour les cas plus réalistes, la puissance autorisée ne dépassera pas quelques mW, les normes seraient alors respectées.

Tableau VI.4 - Comparaison des niveaux d'exposition relatifs aux réseaux d'antennes *off-body* aux limites d'exposition pour les environnements professionnels contrôlés et grand public.

Environnements	Surface (cm ²)	P_0 limite (mW/cm ²)	P_0 (mW/cm ²)			
			A_1	A_2	A_3	A_4
Professionnel	1	100	0,91	54,38	23,95	7,46
	20	5	0,25	2,88	1,07	0,43
Public	1	20	0,91	54,38	23,95	7,46
	20	1	0,25	2,88	1,07	0,43

4.1.2. Température

Nous comparons ici les niveaux de température pics et moyennés sur 1 cm² et 20 cm² calculé numériquement pour les différents réseaux d'antennes avec le modèle thermique du fantôme

utilisant uniquement la source d'exposition électromagnétique comme source de chaleur pour une puissance injectée de 500 mW.

Dans les recommandations fournies par l'ICNIRP, il est admis qu'une hausse de la température de 1 °C - 2 °C (de la température du corps) peut induire l'apparition d'effets néfastes sur la santé. En bande de fréquences millimétriques, les expositions sont généralement localisées sur une partie du corps de quelque cm², et peuvent induire des élévations de température localement élevée. Sur la Figure VI.9 les élévations de température obtenues pour chaque réseau d'antennes sont comparées à la température référence de 1 °C.

L'analyse des courbes montre qu'en ce qui concerne l'élévation de température générée par le réseau d'antennes A_1 , elle est inférieure à ce seuil de température de 1 °C quel que soit le type de valeur de température. Une observation identique est faite pour le réseau A_4 , en revanche ce n'est pas le cas pour les réseaux A_2 et A_3 . Dans le cas du réseau A_2 , le niveau d'élévation de température T_{pic} à 30 sec est presque triplé par rapport à la température seuil, et celui de la température moyenne sur 10 cm² est lui doublé. En revanche dans le cas d'une moyenne sur 20 cm² le niveau de la température généré par le réseau A_2 est 85 % inférieur la température seuil. Dans le cas du réseau d'antennes A_3 , seule l'élévation de température pic est supérieure au seuil de 1 °C. En revanche, dans le cas d'une puissance injectée plus réaliste (typiquement 10 mW), les élévations des valeurs crêtes de d'élévation de température ne dépasseraient pas le seuil de température fixé.

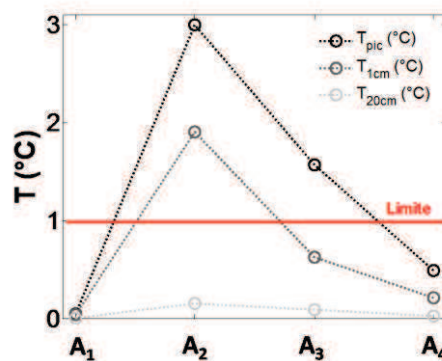


Figure VI.9 - Niveaux d'exposition aux différents réseaux d'antennes *off-body* exprimés avec les températures pics et moyennées calculées avec le modèle thermique du fantôme seul après 30 sec d'exposition.

4.2. Comparaison entre les tendances électromagnétiques et thermiques

Les évolutions des valeurs de densité de puissance incidente calculée avec le modèle électromagnétique tenant compte de la présence du connecteur (Figure VI.1b) et d'élévation de température à 30 sec obtenue avec le modèle thermique du fantôme seul (Figure VI.2a) sont présentées en Figure VI.10 pour chaque réseau d'antennes en fonction du type de valeurs (pic, moyennée sur 1 cm² ou bien 20 cm²).

L'analyse de la Figure VI.10 met en évidence que quel que soit le réseau d'antennes la tendance des niveaux de densité de puissance incidente P_0 entre la valeur pic et la valeur moyennée sur 1 cm² est semblable avec une réduction d'au moins 75 % entre ces deux type de valeur. La même tendance observée pour les valeurs d'élévation de température spécifiques aux réseaux A_3 et A_4 , avec une réduction d'au moins 58 %. En revanche, le comportement est sensiblement différents entre les valeurs de T_{30s} pic et moyennées sur 1 cm² en Figure VI.10a et

Figure VI.10b. En effet, les réductions sont moins importantes (inférieurs à 40 %), en raison de pentes plus faibles entre les valeurs pics et moyennées.

Cette différence d'allure entre P_0 et T_{30s} signifie que les niveaux d'élévation de la température sur la surface moyennée sont plus homogènes. La comparaison des paramètres dosimétriques et thermiques peut donc être utilisée comme un outil permettant d'évaluer l'étendue et le comportement de l'exposition sur la surface.

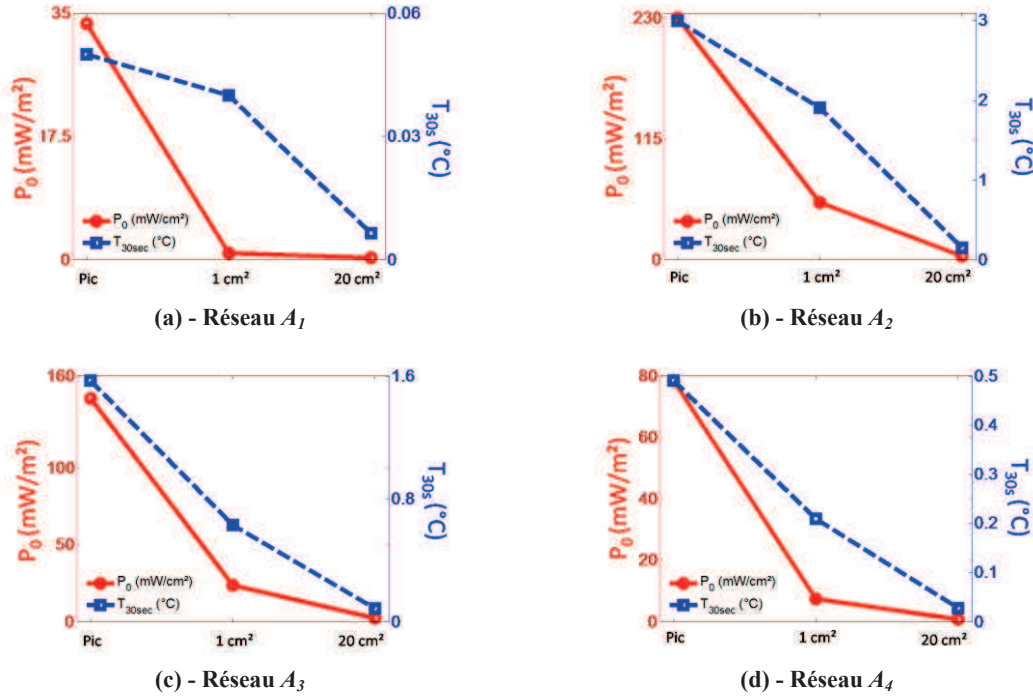


Figure VI.10 - Comportement de la densité de puissance incidente et de l'élévation de température à 30 sec calculée avec le modèle de fantôme seul en fonction du type de valeur pour les réseaux d'antennes.

4.3. Analyse et interprétation des résultats thermiques

Dans cette sous-section, les écarts entre les élévations de température calculées avec le modèle thermique du fantôme seul ($T_{fantôme}$) et celles calculées avec le modèle ($T_{complet}$) sont analysées pour chaque réseaux d'antennes en termes d'élévation de température pic (Figure VI.11a) et moyenne sur 1 cm² (Figure VI.11b) et 20 cm² (Figure VI.11c).

La comparaison des élévations de température pic (Figure VI.11a) révèle des écarts importants entre les valeurs numériques obtenues $T_{fantôme}$ et $T_{complet}$. En effet, il existe un rapport entre $T_{fantôme}$ et $T_{complet}$ compris entre 1,3 et 3,2 soit des écarts de température compris entre 0,11 °C dans le cas du réseau A_1 à +2,9 °C dans le cas du réseau A_2 .

La comparaison des températures moyennées montre en revanche des écarts stables entre $T_{fantôme}$ et $T_{complet}$ quel que soit le réseau. En effet, dans le cas de l'élévation de température moyenne sur 1 cm² les écarts sont de l'ordre de 0,13 °C \pm 0,04 °C, et dans le cas moyenné sur 20 cm² les écarts sont plus faibles, seulement 0,03 °C \pm 0,005 °C. En revanche, même si les écarts absolus sont faibles, cela représente des pourcentages d'autant plus importants que les niveaux d'élévation de température sont peu élevés. Dans le cas du réseau A_1 , les valeurs d'élévation de température moyennées sur 1 cm² et sur 20 cm² pour $T_{fantôme}$ ne représentent que 33 % et 25 % de la valeur $T_{complet}$, alors que pour A_2 les proportions sont respectivement de 93 % et 83 %.

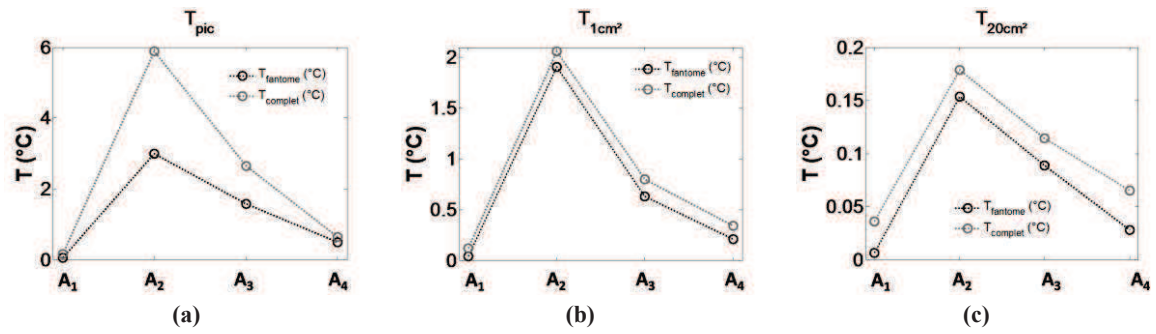


Figure VI.11 - Comparaison des niveaux de température (a) pics, (b) moyennés (1 cm²) et (c) moyennés sur 20 cm² entre les différents réseaux d'antennes off-body obtenus numériquement avec le modèle thermique du fantôme seul et celui dit complet.

5. Conclusion

Dans ce dernier chapitre une étude a été menée regroupant à la fois l'analyse comparative des réseaux d'antennes imprimées et l'analyse thermique du fantôme en cas d'exposition à ces réseaux. Les résultats présentés visent à estimer d'une part, l'impact des contraintes de connectique sur les niveaux d'exposition à 60 GHz du fantôme aux différents réseaux d'antennes A_1 , A_2 , A_3 et A_4 , et d'autre part à comparer les niveaux d'exposition dosimétriques et thermiques.

Premièrement, une étude dosimétrique et thermique numérique de l'exposition du fantôme aux différents réseaux d'antennes *off-body* a été présentée. L'étude dosimétrique a mis en évidence les effets des contraintes de connectique (languette d'accès et connecteur) sur les distributions et niveaux de DAS à 60 GHz en surface du fantôme équivalent. Un effet très marqué de la ligne micro-ruban sur la languette a été observé pour les réseaux d'antennes A_3 et A_4 , avec des valeurs pics et moyennées de DAS 2 à 10 plus importantes que le réseau A_1 . La présence du connecteur est aussi très impactant sur les niveaux de DAS pics des réseaux A_3 et A_4 (6 à 16 fois plus élevés), en raison d'une part les réflexions sur le support du connecteur et d'autre part par le rayonnement électromagnétique du connecteur. La contribution apportée par l'échauffement de la structure antenne et par le connecteur sur l'élévation de température en surface du fantôme a également été estimée numériquement. La comparaison des pics de température calculés en surface du fantôme avec le modèle complet a montré des augmentations de l'élévation de température de plusieurs dizaines de pourcent en fonction du type de réseau d'antennes. Dans le cas de l'exposition du réseau A_1 , c'est l'échauffement du connecteur qui est le principal contributeur à l'augmentation de l'élévation de température alors que dans le cas du réseau A_2 , c'est l'échauffement de la structure. Dans le cas des réseaux A_3 et A_4 , c'est l'échauffement de la languette qui contribue à l'augmentation de l'élévation de température en surface du fantôme équivalent.

Deuxièmement, des mesures thermiques ont été réalisées en utilisant deux dispositifs de mesure (papier filtre et fantôme) pour valider les distributions de température numériques. Les distributions obtenues avec le dispositif utilisant le papier filtre confirment clairement les allures obtenues numériquement. Les élévations de température sur le fantôme sont uniquement mesurées sur la surface du fantôme entourant la structure antenne, cependant des allures expérimentales semblables à celles calculées numériquement sont observées sur la surface du fantôme bordant les structures de certains réseaux d'antennes.

Troisièmement, une analyse dosimétrique et thermique des niveaux d'exposition numériques a été proposée pour les différents réseaux d'antennes. Les niveaux d'exposition ont été comparés aux limites d'exposition recommandées par l'ICNIRP pour le cas le plus défavorable autorisé en termes de puissance de transmission pour les antennes à 60 GHz. Cette comparaison a montré que dans le cadre d'expositions dans un environnement grand public, deux antennes, A_2 et A_3 ne respectaient pas les seuils fixés pour la densité de puissance incidente moyenne sur 1 cm² et 20 cm². De plus, pour ces deux réseaux, le niveau de température pic dépasse le seuil d'élévation de 1 °C au delà duquel des effets sur la santé peuvent apparaître. Cependant, pour des cas plus réalistes où la puissance utilisée n'est que de quelques mW l'ensemble des réseaux respecterait les limites d'exposition.

La comparaison des allures des valeurs électromagnétiques et thermiques en fonction du type de valeur (pic, 1 cm², 20 cm²) a montré que l'analyse thermique pouvait apporter des informations concernant l'homogénéité spatiale des distributions et donc donner de l'information sur l'étendue de la zone potentiellement impactée par l'exposition du fantôme.

6. Références

- [1] A. Pellegrini, A. Brizzi, L. Zhang, K. Ali, Y. Hao, X. Wu, C. C. Constantinou, Y. Nechayev, P. S. Hall, N. Chahat, and others, “Antennas and propagation for body-centric wireless communications at millimeter-wave frequencies: A review [wireless corner],” *Antennas Propag. Mag. IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 262–287, 2013.
- [2] F. P. Incropera, D. P. Dewitt, T. L. Bergma, and A. Lavine, *Principles of Heat and Mass Transfers*, 7th ed. Singapore: John Wiley & Sons, 2013.
- [3] “Emissivity Values for Common Materials ‘<http://www.infrared-thermography.com/material-1.htm>.’”
- [4] “V Female Sparkplug Launcher Connector, V102F-R, Anrisu, ‘<http://www.anritsu.com/en-US/components-accessories/products/v102f-r>.’”
- [5] O. P. Gandhi and A. Riazi, “Absorption of millimeter waves by human beings and its biological implications,” *Microw. Theory Tech. IEEE Trans. On*, vol. 34, no. 2, pp. 228–235, 1986.
- [6] E. P. Khizhnyak and M. C. Ziskin, “Heating patterns in biological tissue phantoms caused by millimeter wave electromagnetic irradiation,” *Biomed. Eng. IEEE Trans. On*, vol. 41, no. 9, pp. 865–873, 1994.
- [6] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, “ICNIRP guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic and electromagnetic fields (up to 300 GHz)”, vol. 74. Health Physics, 1998.

Conclusion et perspectives

Conclusion générale

Le travail effectué au cours de cette thèse a porté sur l'analyse, la quantification et la réduction du couplage antennes/corps dans le cadre des réseaux de communication sans fil centrés sur le corps humain à 60 GHz.

Dans une première partie du manuscrit nous nous sommes concentrés sur l'évaluation et la quantification de l'impact du choix de la méthode d'alimentation de réseaux d'antennes comportant 2×2 éléments et dédiés aux communications *off-body* à 60 GHz, sur les interactions corps/antennes.

Pour ce faire, nous avons commencé dans le chapitre II par présenter et comparer les géométries, ainsi que les performances en espace libre et en présence d'un fantôme équivalent de la peau humaine de plusieurs réseaux d'antennes dont les méthodes d'alimentation diffèrent. Une étude dosimétrique quantitative a également été réalisée afin de mettre en évidence le niveau d'exposition relatif à chaque réseau d'antennes à 60 GHz. Les résultats de l'étude quantitative ont mis en évidence deux critères à respecter lors du choix de la méthode d'alimentation pour réduire le couplage corps/antenne. Le premier critère consiste à choisir une méthode d'alimentation nécessitant la présence d'un plan de masse (conclusion attendue). L'analyse quantitative dosimétrique réalisée a montré que ce critère permettait de réduire dans un facteur d'au moins 55 les valeurs maximales de pic de DAS. Le deuxième critère impose le choix d'une méthode d'alimentation garantissant le maintien d'un écart entre les éléments rayonnants du réseau de $\lambda_0/2$ à 60 GHz afin de réduire le niveau du rayonnement dans des directions non souhaitées. La comparaison des niveaux de DAS pic entre les réseaux respectant ou non ce critère a mis en évidence une réduction de l'ordre de 30 %. Dans certaines structures antennaires la présence de lignes de blindage verticales sur les bords de la structure peut également se révéler être un critère favorisant la réduction du couplage corps/antennes.

Les réseaux d'antennes *off-body* à 60 GHz ont fait l'objet d'une phase de prototypage et de mesures expérimentales qui ont été détaillées dans le chapitre III du manuscrit. Les différentes contraintes de réalisation et de connectique de chaque réseau d'antennes ont été intégrées aux modèles numériques afin de ré-optimiser les structures et les dimensions des réseaux. Une analyse paramétrique a été effectuée à partir des tolérances de gravure et d'alignement entre les niveaux de cuivre des structures antennaires pour évaluer la sensibilité des réseaux. Les incertitudes de gravure et d'alignement ont ensuite pu, pour certaines, être évaluées après réalisation, respectivement par mesure sous microscope binoculaire et par scanner à rayon X, montrant que globalement les tolérances annoncées avaient été respectées. Les performances des prototypes des différents réseaux d'antennes mesurées en espace libre et en présence du fantôme équivalent à 60 GHz ont été analysées et comparées aux résultats obtenus numériquement avec des modèles CST MWS équivalents. L'analyse des résultats expérimentaux a montré que les différents réseaux d'antennes réalisés sont adaptés à -10 dB à 60 GHz et que les niveaux du module du coefficient de réflexion sont très stables en cas de présence du fantôme, à l'exception, comme attendu, du réseau d'antennes ne présentant pas de plan de masse arrière. Le rayonnement des différents prototypes

de réseaux d'antennes est globalement stable sur la bande de fréquence 59-61 GHz ; cependant une sensibilité plus accrue est observée au niveau des lobes secondaires et du rayonnement arrière. La comparaison avec les résultats obtenus numériquement a montré un accord satisfaisant des modèles de rayonnement pour trois des quatre réseaux analysés. La comparaison des diagrammes en espace libre et sur le fantôme a, comme attendu, montré que l'impact du fantôme était d'autant plus important que les niveaux de rayonnement arrière et des lobes secondaires sont élevés. Les différences des niveaux de rayonnement ont été quantifiées en présence et sans fantôme révélant des variations du niveau de rayonnement arrière en présence du fantôme pouvant atteindre 20 dB.

Avec l'accroissement des applications de communication centrées sur le corps, l'utilisation de fantôme s'est fortement développée pour les études dosimétriques expérimentales basées sur la mesure de l'élévation de la température. Afin de réaliser une étude quantitative dosimétrique et thermique du couplage entre les différents réseaux d'antennes *off-body* réalisés et le fantôme équivalent de la peau à 60 GHz, nous avons consacré la seconde partie de ce manuscrit à l'étude du comportement thermique du fantôme.

La modélisation thermique du fantôme exposé à une onde plane est présentée dans le chapitre IV. Le fantôme équivalent a été caractérisé thermiquement par mesures, et une interprétation analytique des échanges de chaleur a été réalisée afin de résoudre l'équation de chaleur relative au fantôme d'épaisseur finie. Le comportement de la solution a ensuite été analysé pour plusieurs épaisseurs et conditions d'échanges aux interfaces du fantôme.

Dans le chapitre V, le comportement thermique du fantôme équivalent de la peau (décrit analytiquement par la solution de l'équation de transfert de chaleur) a été validé numériquement et expérimentalement. La comparaison des dynamiques de température mesurée sur la surface exposée pendant 1 h et des distributions de température selon l'épaisseur du fantôme à 500 sec, a montré un très bon accord avec les résultats obtenus par résolution de l'équation de transfert de chaleur (écarts inférieurs à 5 %). Un dispositif et un protocole de mesure utilisant la thermométrie infrarouge ont été établis pour la validation expérimentale du comportement thermique du fantôme équivalent. Une étude numérique a été effectuée au préalable des mesures afin d'estimer les plages d'incertitude de mesures liées aux variations potentielles de certains paramètres du modèle d'exposition. Les résultats obtenus pour plusieurs fantômes d'épaisseurs différentes présentent une bonne reproductibilité de mesure quelle que soit l'épaisseur. Un bon accord est également observé entre les résultats thermiques expérimentaux et les résultats obtenus avec un modèle numérique équivalent, validant ainsi le modèle thermique établi pour le fantôme équivalent de la peau humaine d'épaisseur finie.

Dans le dernier chapitre, une analyse dosimétrique et thermique numérique du couplage antenne/corps à 60 GHz est présentée. Dans cette étude l'impact des contraintes de connectique sur les distributions et les niveaux de DAS (ajout de la languette d'alimentation et présence du connecteur) a été quantifié pour les différents réseaux d'antennes. Pour cela la prise en compte de ces contraintes est indispensable afin de pouvoir comparer et valider simulations et mesures. De plus, en raison de la proximité entre la structure antennaire montée sur connecteur et le fantôme, les contributions de l'échauffement du connecteur et du réseau d'antennes sur le niveau total d'élévation de température ont été évaluées. Il a été observé que ces contributions induisent des augmentations très importantes des valeurs d'élévation de température pics en surface du fantôme de plusieurs dizaines de pourcent. Pour valider expérimentalement les distributions d'élévation de température numériques, deux dispositifs de mesure utilisant une caméra infrarouge ont été mis au point (papier filtre et fantôme). La comparaison des distributions des élévations de température

mesurées avec celles simulées a révélé un bon accord, particulièrement dans le cas des mesures réalisées avec le dispositif utilisant le papier filtre.

Perspectives de travail

Le travail réalisé au cours de ces trois années de thèse, a mis en évidence certains aspects de la thématique qui pourront être approfondis dans le futur.

D'un point de vue antennes, nous avons limité nos travaux aux antennes réalisées sur des matériaux conventionnels ; or dans le cadre des applications BAN les antennes peuvent être amenées à être intégrées sur des matériaux souples et déformables comme le textile. Ce qui suggère qu'une étude comparative du couplage corps/antenne pourrait également être réalisée en fonction de certains critères de conception concernant les antennes intégrées au textile, ou encore en fonctions des déformations potentiellement subies par l'antenne au cours de son utilisation.

En ce qui concerne le fantôme équivalent, bien que l'absorption du rayonnement électromagnétique à 60 GHz soit concentrée dans les premiers millimètres d'épaisseur sous la surface exposée, l'impact thermique peut s'étendre beaucoup plus en profondeur. Une observation semblable avait déjà été faite dans de précédentes études en ce qui concerne les tissus humain, suggérant l'utilisation de modèles multicouches pour les études thermiques. Dans nos travaux nous nous sommes concentrés sur le modèle expérimental électromagnétique de la peau monocouche dont nous disposions. Cependant nous avons commencé à imaginer une approche analytique permettant de rapprocher les résultats expérimentaux obtenus sur fantôme monocouches de ceux obtenus avec un modèle analytique ou bien numérique multicouches. Il pourrait être intéressant de poursuivre ces travaux vers le développement d'une méthode permettant d'estimer les niveaux d'élévation de température dans le corps à partir de mesure sur fantôme, ou bien vers le développement d'un fantôme multicouches équivalent à la fois électromagnétique et thermique du corps humain.

Un autre aspect à développer concerne l'extension de l'étude comparative du couplage corps/antennes réalisée avec les différents réseaux d'antennes, en utilisant des fantômes de formes plus réalistes comme une main, afin de mettre en évidence les changements en termes de couplage corps/antenne liés aux caractéristiques de la surface exposée.

Annexe A : Composition et procédure de fabrication du fantôme équivalent de la peau à 60 GHz

Au cours des travaux de thèse nous avons utilisé un fantôme équivalent de la peau humaine à 60 GHz développé à l'IETR [1]. La composition et la procédure de fabrication de ce fantôme sont détaillées dans les paragraphes qui suivent.

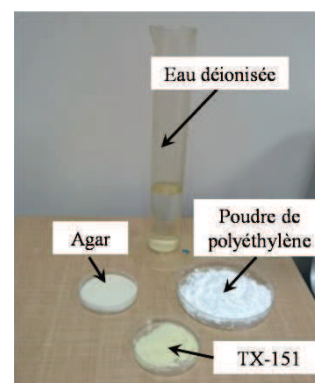
Composition du fantôme semi-solide

Le fantôme semi-solide utilisé pour émuler les propriétés électriques de la peau humaine à 60 GHz est composé d'eau déionisée, d'agar, de poudre de polyéthylène, de TX-151 ainsi que d'azoture de sodium (NaN_3), dont les proportions de chaque constituant sont données en Figure A.1.

La peau étant un tissu composé à majorité d'eau, l'eau déionisée est le composant principal du fantôme. L'agar est un agent gélifiant utilisé pour permet le modelage du fantôme, son impact sur les propriétés diélectriques du fantôme est négligeable. La permittivité complexe du fantôme est ajustée via la proportion de poudre de polyéthylène dans le mélange, la poudre de polyéthylène permet de réduire la partie réelle et imaginaire de la permittivité complexe du mélange. Le TX-151 est un agent permettant d'augmenter la viscosité du mélange d'eau et d'agar afin de rendre possible l'incorporation de la poudre de polyéthylène au mélange. Et l'azoture de sodium (NaN_3) est utilisé comme conservateur afin d'accroître la durée de vie du fantôme semi-solide.

Ingrédient	Quantité (g)
Eau déionisée	100
Agar	1,5
Poudre de polyéthylène	20
TX-151	2,5
Azoture de sodium	0,2

(a)



(b)

Figure A.1 - Composants du fantôme semi-solide de la peau à 60 GHz. (a) Composition [1] et (b) photographie des ingrédients.

Etapes de fabrication du fantôme

Etape 1 : Mélange 1

L'eau déionisée est versée dans un récipient (casserole) pour y être chauffée (Figure A.2a). Une fois l'eau tiédie, l'agar y est incorporé progressivement en remuant doucement le mélange (Figure A.2b), afin d'obtenir un mélange homogène. Le conservateur NaN_3 , si il est utilisé, est aussi ajouté au mélange au cours de cette étape.



(a)



(b)

Figure A.2 - Procédures relatives à la phase de mélange 1.

Etape 2 : Chauffage du mélange

Le mélange d'eau déionisé et d'agar est ensuite chauffé sur un réchaud, et porté jusqu'à ébullition. Le réchaud est arrêté dès le commencement de l'ébullition.

Etape 3 : Mélange 2

Une fois le mélange eau et agar porté à ébullition, il est versé dans le bol d'un mixeur. Le TX-151 est ajouté progressivement au mélange au cours de l'agitation mécanique du batteur (Figure A.3) afin d'éviter l'apparition de masses agglomérées dans le mélange.



(a)



(b)

Figure A.3 - Incorporation du TX-151 au mélange eau + agar.

La poudre de polyéthylène est ensuite aussi ajoutée progressivement au mélange par agitation mécanique (Figure A.4). La mixture est pétrie jusqu'à obtention de la texture souhaitée.



(a)



(b)

Figure A.4 - Incorporation de la poudre de polyéthylène au mélange eau + agar + TX-151.

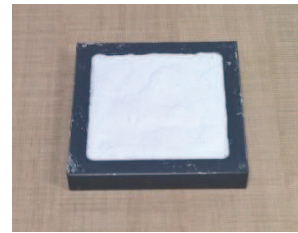
Etape 4 : Moulage

Une fois la texture souhaitée de la mixture obtenue (Figure A.5a), la mixture est déposée dans un moule, dont la forme est peut-être simpliste comme sur la Figure A.5, ou bien plus réaliste comme dans [2].

Après moulage le fantôme doit reposer plusieurs heures à température ambiante afin de se solidifier et de refroidir pour conserver la forme du moule. Le fantôme semi-solide peut se conserver plusieurs jours au réfrigérateur.



(a)



(b)

Figure A.5 - Moulage du fantôme semi-solide.

Références

- [1] N. Chahat, M. Zhadobov, S. Alekseev, and R. Sauleau, “Human skin-equivalent phantom for on-body antenna measurements in 60 GHz band,” *Electron. Lett.*, vol. 48, no. 2, pp. 67–68, 2012.
- [2] N. Chahat, M. Zhadobov, and R. Sauleau, “Broadband Tissue-Equivalent Phantom for BAN Applications at Millimeter Waves,” *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 60, no. 7, pp. 2259–2266, Jul. 2012.

Annexe B : Dimensions des réseaux d'antennes *off-body* optimisées et mesurées

Dans cette annexe, nous détaillons les dimensions des différents éléments gravés sur les niveaux de cuivre des réseaux d'antennes *off-body*. Les valeurs numériques des dimensions optimales des gravures sont données dans des tableaux et comparées aux valeurs évaluées par mesure sous microscope binoculaire sur les niveaux de gravure accessibles après réalisation.

Cette annexe est scindée en deux parties, dans la première on donne les dimensions des réseaux d'antennes dits non-empilés A_1 , A_2 , A_3 (ou A_{3b}) et A_4 (A_{4b}). Dans la seconde ce sont les dimensions des réseaux cette fois empilés As_1 , As_2 , As_3 (ou As_{3b}) et As_4 (ou As_{4b}) qui sont fournies.

1. Dimensions des réseaux d'antennes non-empilés

1.1. Réseaux d'antennes A_1

Dans le Tableau C.1 sont données les valeurs numériques et mesurées des paramètres des gravures sur la couche m_1 du réseau A_1 schématisés en Figure C.1. Précisons que les valeurs mesurées sont celles spécifiques à un prototype de réseau d'antennes A_1 (prototype #5).

Tableau C.1 - Valeurs numériques et mesurées au microscope binoculaire des paramètres du réseau d'antennes A_1 .

Paramètres	Valeurs (mm)	
	numériques	mesurées
W	2,30	2,29
L	1,50	1,48
e_x	1,40	1,39
e_y	2,20	ø
W_1	0,36	0,36
L_2	1,67	1,66
W_3	0,36	0,37
L_3	0,92	0,91

1.2. Réseaux d'antennes A_2

Le Tableau C.2 fourni les dimensions numériques et mesurées sur un des prototypes A_2 (prototype #22). Seules les dimensions des gravures sur les niveaux m_1 et m_3 sont mesurées (Figure C.1), les gravures des fentes sur le niveau m_2 n'étant plus accessible après la fin de la procédure de réalisation.

Tableau C.2 - Valeurs numériques et mesurées au microscope binoculaire des paramètres du réseau d'antennes A_2 .

Paramètres	Valeurs (mm)	
	numériques	mesurées
W	1,50	1,53
L	1,10	1,13
e_x	1,00	0,98
e_y	1,40	1,36
W_f	1,05	∅
L_f	0,15	∅
d_s	2,50	∅
W_1	0,33	0,33
L_2	0,92	0,92
W_2	0,28	0,26
L_3	2,30	2,33
W_3	0,17	0,15
W_{stub}	0,20	0,19
L_{stub}	1,10	1,12

1.3. Réseaux d'antennes A_3 ou A_{3b}

Les dimensions spécifiques à la fois aux réseaux d'antennes A_3 et A_{3b} sont données en Tableau C.3. Les dimensions mesurées ont été estimées pour le prototype A_3 numéro #8. Seules les dimensions relatives aux antennes imprimées sur le niveau m_1 , et celle de la ligne micro-ruban sur la languette d'alimentation sur le niveau m_3 sont accessibles après réalisation (Figure C.1).

Tableau C.3 - Valeurs numériques et mesurées au microscope binoculaire des paramètres du réseau d'antennes A_3 ou A_{3b} .

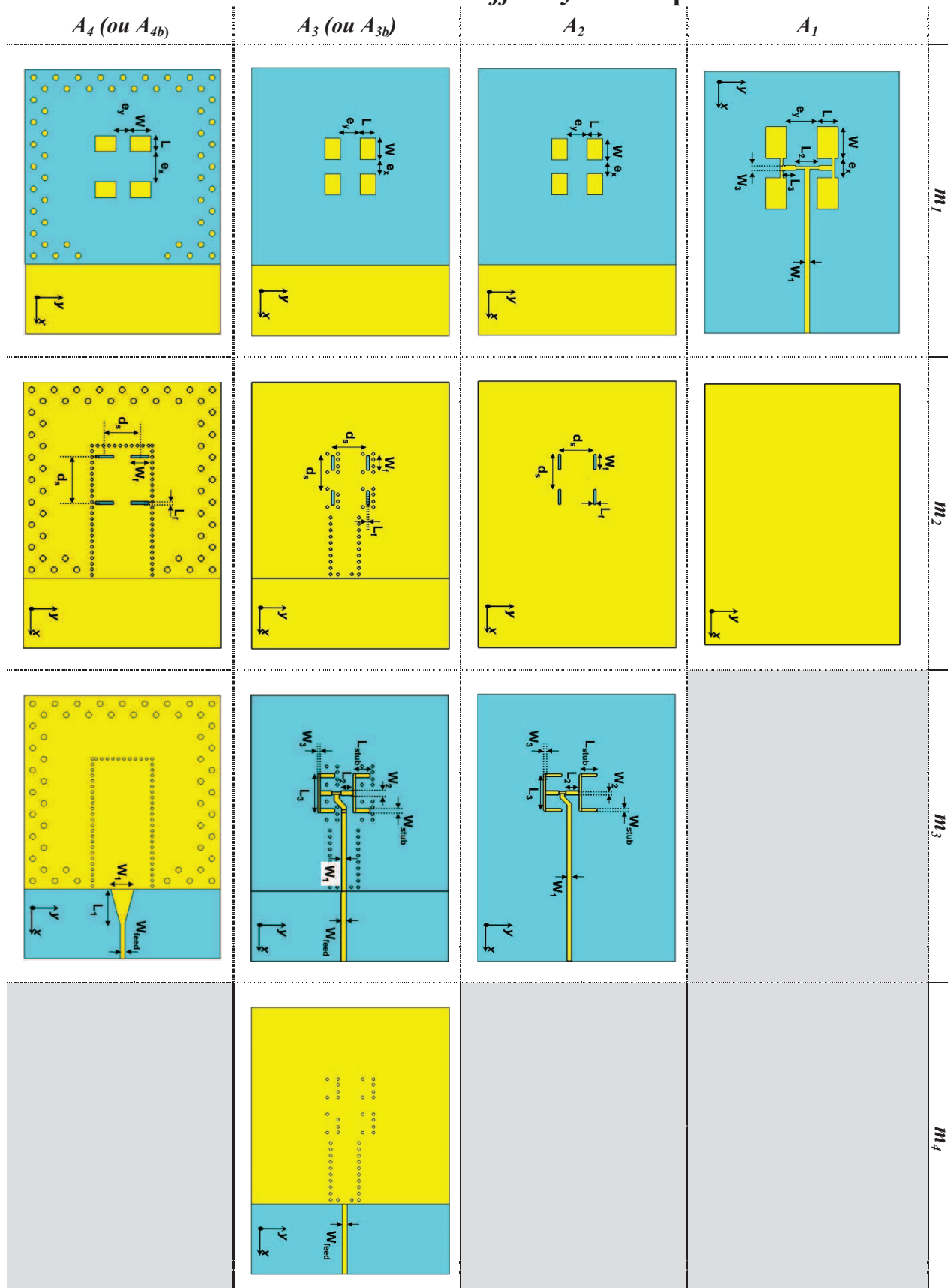
Paramètres	Valeurs (mm)	
	numériques	mesurées
W	1,50	1,48
L	1,11	1,12
e_x	1,00	1,03
e_y	1,39	1,38
W_f	1,00	∅
L_f	0,20	∅
d_s	2,50	∅
W_{feed}	0,36	0,372
W_1	0,34	∅
L_2	0,84	∅
W_2	0,34	∅
L_3	2,80	∅
W_3	0,16	∅
W_{stub}	0,30	∅
L_{stub}	1,02	∅

1.4. Réseaux d'antennes A_4 ou A_{4b}

Les valeurs numériques optimisées sous CST MWS et expérimentales mesurées au microscope binoculaire pour le prototype du réseau d'antennes A_4 numéro #21 sont données dans le Tableau C.4. Comme pour le prototype du réseau d'antennes A_2 , seules les gravures sur les niveaux de cuivre m_1 et m_3 peuvent être mesurées (Figure C.1).

Tableau C.4 - Valeurs numériques et mesurées au microscope binoculaire des paramètres du réseau d'antennes A_4 ou A_{4b} .

Paramètres	Valeurs (mm)	
	numériques	mesurées
W	1,50	1,51
L	1,12	1,13
e_x	2,18	2,17
e_y	1,00	1,02
W_f	1,30	∅
L_f	0,20	∅
d_s	2,50	∅
W_{feed}	0,33	0,31
W_1	1,65	1,66
L_1	2,50	2,55

Réseaux d'antennes *off-body* non-empilés

Niveaux de métallisation des réseaux d'antennes

Figure C.1 - Paramètres et géométries des réseaux d'antennes *off-body* non-empilés.

2. Dimensions des réseaux d'antennes empilées

Dans les versions des réseaux d'antennes *off-body* où deux couches d'antennes sont empilées, les paramètres relatifs aux dimensions des antennes dites empilées sur le niveau de cuivre supplémentaire sont données en Figure C.2, et les paramètres des gravures sur les autres couches sont identiques à ceux des versions non-empilées présentées dans la section 1 de cette annexe.

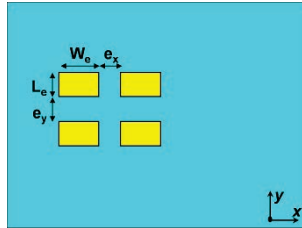


Figure C.2 - Paramètres des antennes empilées quel que soit le réseau d'antennes.

Dans les structures des réseaux d'antennes empilées, l'indice du niveau de cuivre des géométries présentées en Figure C.1 est incrémenté de 1, le niveau m_l étant obligatoirement celui où sont gravées les antennes empilées (Figure C.2).

Les sous-sections qui suivent détaillent, les dimensions numériques et mesurées au microscope pour les différentes versions des réseaux d'antennes *off-body* empilées.

2.1. Réseaux d'antennes As_l

Le Tableau C.5 résume les dimensions numériques et mesurées des gravures sur les niveaux de cuivre accessibles du prototype #24 du réseau d'antennes As_l . Avec ce réseau d'antennes, la vérification des dimensions de l'arborescence d'alimentation n'est pas possible, car les lignes micro-ruban sont enterrées entre deux couches de substrat.

Tableau C.5 - Valeurs numériques et mesurées au microscope binoculaire des paramètres du réseau d'antennes As_l .

Paramètres	Valeurs (mm)	
	numériques	mesurées
W_e	1,60	1,61
L_e	1,18	1,19
e_x	2,10	2,08
e_y	2,52	2,52
W	1,65	∅
L	1,38	∅
W_1	0,33	0,33
L_2	1,87	∅
W_3	0,31	∅
L_3	0,84	∅

2.2. Réseaux d'antennes As_2

Les dimensions du réseau d'antennes As_2 sont données dans le Tableau C.6. Les niveaux de gravure m_l et m_4 du réseau sont accessibles permettant respectivement la mesure des dimensions des antennes imprimées dites empilées et celle des dimensions des gravures caractéristiques de l'arborescence d'alimentation et d'excitation des fentes.

Tableau C.6 - Valeurs numériques et mesurées au microscope binoculaire des paramètres du réseau d'antennes A_2 .

Paramètres	Valeurs (mm)	
	numériques	mesurées
W_e	1,50	1,45
L_e	1,20	1,15
e_x	1,00	1,05
e_y	1,30	1,36
W	1,50	∅
L	1,16	∅
W_f	1,05	∅
L_f	0,15	∅
d_s	2,50	∅
W_1	0,33	0,32
L_2	0,91	0,90
W_2	0,28	0,25
L_3	2,30	2,34
W_3	0,17	0,16
W_{stub}	0,20	0,16
L_{stub}	1,19	1,20

2.3. Réseaux d'antennes As_3 ou As_{3b}

Le Tableau C.7 donne uniquement les dimensions numériques optimales des réseaux d'antennes As_3 ou bien As_{3b} , ces derniers n'étant pas été réalisés.

Tableau C.7 - Valeurs numériques et mesurées au microscope binoculaire des paramètres du réseau d'antennes A_3 ou A_{3b} .

Paramètres	Valeurs (mm)	
	numériques	mesurées
W_e	1,50	∅
L_e	1,30	∅
e_x	1,00	∅
e_y	1,15	∅
W	1,45	∅
L	1,13	∅
W_f	1,10	∅
L_f	0,15	∅
d_s	2,50	∅
W_{feed}	0,36	∅
W_1	0,34	∅
L_2	0,34	∅
W_2	0,84	∅
L_3	2,78	∅
W_3	0,14	∅
W_{stub}	0,28	∅
L_{stub}	1,04	∅

2.4. Réseaux d'antennes As_4 ou As_{4b}

Les dimensions numériques des gravures sur les niveaux de cuivre des réseaux d'antennes As_4 et As_{4b} sont données en Tableau C.8.

Tableau C.8 - Valeurs numériques et mesurées au microscope binoculaire des paramètres du réseau d'antennes A_4 ou A_{4b} .

Paramètres	Valeurs (mm)	
	numériques	mesurées
W_e	1,30	∅
L_e	1,24	∅
e_x	1,66	∅
e_y	1,20	∅
W	1,30	∅
L	1,16	∅
W_f	1,10	∅
L_f	0,25	∅
d_s	2,50	∅
W_{feed}	0,33	∅
W_1	1,80	∅
L_1	2,90	∅

Annexe C : Adaptation et performances en rayonnement numérique des réseaux d'antennes *off-body* 60 GHz sans connecteur

Les performances numériques des réseaux d'antennes prenant en compte les contraintes de fabrication (couches de prépreg, renforts de cuivre, diamètres de perçage et languettes d'alimentation) obtenues après ré-optimisation des paramètres sont données dans cette annexe pour deux configurations de simulation. En effet les performances obtenues en espace libre sont comparées à celles obtenues en présence du fantôme équivalent. Dans les deux cas les performances ont été calculées en utilisant le solveur temporel du module de simulation électromagnétique 3D du logiciel CST MWS. Pour les modèles numériques des réseaux d'antennes en espace libre ou bien en présence du fantôme équivalent, nous avons utilisé : (1) des couches absorbantes parfaites comme conditions limites aux frontières de simulation, (2) des ports d'excitation de type guide d'onde, (3) des maillages locaux ont été définis pour mailler les éléments des réseaux d'antennes les plus critiques (critère de maillage $\lambda_g/25$ suivant x et y), ainsi que l'épaisseur du fantôme sous la surface exposée au rayonnement des réseaux (critère de maillage $\lambda_g/50$ suivant z entre 0 et 0,5 mm). Le fantôme est modélisé par un parallélépipède à base carrée de 80 mm de côté et d'épaisseur de 2 mm. Il est défini par un matériau à la permittivité complexe égale à $\varepsilon^* = 7,4 - j11,4$ à 60 GHz avec une masse volumique ρ égale à 880 kg/m³. Dans les modèles de simulation des réseaux d'antennes avec fantôme, l'écartement entre la surface du fantôme et la face arrière du réseau d'antennes est fixé à 4,5 mm. Cet écart correspond à l'écart minimal dans le cas où les réseaux d'antennes sont montés sur connecteur.

1. Adaptation numériques des réseaux d'antennes sur la bande de fréquences 55-65 GHz

Les courbes de niveau du module de coefficient de réflexion des réseaux d'antennes A_1 , A_2 , A_3 , A_{3b} , A_4 et A_{4b} sur la bande 55-65 GHz obtenues par simulation électromagnétiques en espace libre et en présence du fantôme sont données en Figure D.1. Quel que soit le réseau d'antennes analysé, le niveau du module S_{11} à 60 GHz est inférieur à -10 dB

Tableau D.1 - Descriptifs des bandes de fréquences numériques adaptées à -10 dB des réseaux d'antennes *off-body* sur la bande 55-65 GHz.

Réseaux d'antennes	Fréquence basse (GHz)	Fréquence haute (GHz)	Bande passante à -10 dB (GHz)
A_1	57,9	60,6	2,7
A_2	57,6	63,7	6,1
A_3	57,0	61,7	4,7
A_{3b}	57,0	61,8	4,8
A_4	57,9	62,0	4,1
A_{4b}	57,9	61,8	3,9

Les caractéristiques des bandes de fréquence où les réseaux sont adaptés à -10 dB sont relevées et présentées dans le Tableau D.1 en termes de fréquence basse, de fréquence haute et de largeur de bande.

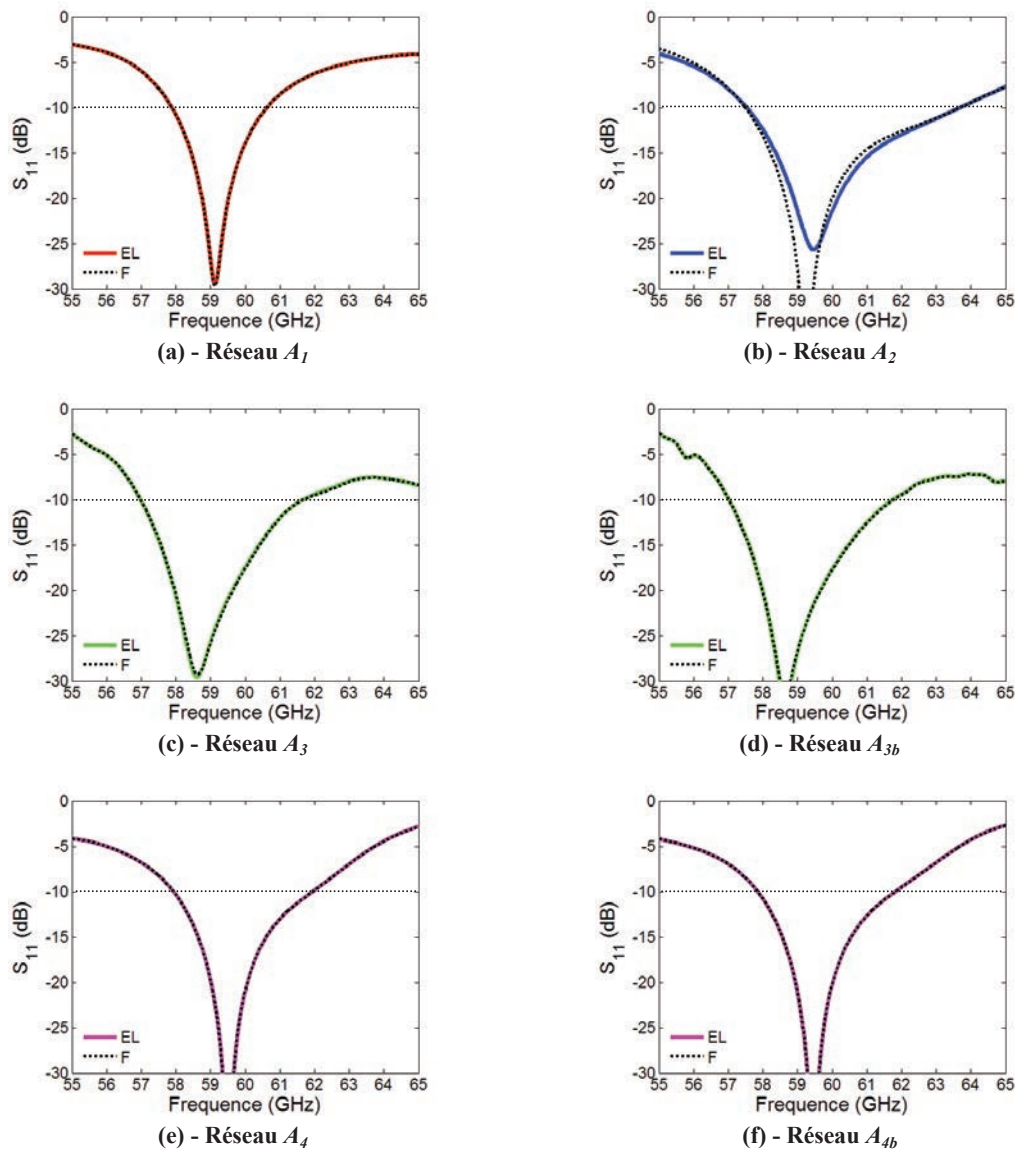


Figure D.1 - Module du coefficient de réflexion des réseaux d'antennes simulés sur la bande 55-65 GHz (—) en espace libre (EL) et (•••) en présence du fantôme équivalent (F).

2. Performances en rayonnement des réseaux d'antennes *off-body* à 60 GHz

2.1. Modèles de rayonnement

Les diagrammes de rayonnement polaires normalisés dans les plans E et H des différents réseaux d'antennes *off-body* sont présentés en Figure D.2. Comme attendu, des lobes secondaires de rayonnement sont observables dans le cas des réseaux d'antennes A_1 et A_4 dont l'écartement inter-élément est supérieur à $\lambda_0/2$. Les niveaux de ces lobes sont donnés dans le Tableau D.2. En espace libre, le rayonnement arrière du réseau d'antennes A_2 est très élevé atteignant jusqu'à -9 dB.

En présence du fantôme équivalent, c'est le rayonnement de ce réseau qui est le plus impacté avec un niveau de l'ordre de -35 dB.

Tableau D.2 - Caractéristiques des modèles de rayonnement numériques des réseaux d'antennes *off-body* à 60 GHz.

Réseaux d'antennes	Lobes secondaires		Rayonnement arrière à 180° (dB)	
	<i>présence</i>	<i>niveau</i> (dB)	<i>EL</i>	<i>F</i>
A_1	oui	-15	-22	-30
A_2	non	∅	-9	-35
A_3	non	∅	-25	-40
A_{3b}	non	∅	-30	-40
A_4	oui	-8	-19	-35

2.2. Gain et directivité

L'analyse des valeurs de gain et de directivité numériques résumées dans Tableau D.3, montre que les performances en rayonnement sont majoritairement conformes aux exigences des antennes dédiées aux communications centrées sur le corps humain.

Comme déjà observé avec les résultats numériques des réseaux d'antennes théoriques, le gain et la directivité des réseaux d'antennes tend à croître en présence du fantôme équivalent. Par exemple dans le cas du réseau A_2 , la présence du fantôme accroît de 0,4 dB le niveau de gain qui passe à 10,2 dB et de 0,2 dBi la directivité qui est égale à 11,2 dBi.

Tableau D.3 - Directivité et gain numériques à 60 GHz des réseaux d'antennes *off-body*.

Réseaux d'antennes	Gain (dB)		Directivité (dBi)	
	<i>EL</i>	<i>F</i>	<i>EL</i>	<i>F</i>
A_1	13,3	13,6	12,2	12,3
A_2	9,8	10,2	11,0	11,2
A_3	11,0	11,2	11,9	12,3
A_{3b}	11,5	11,5	11,4	11,5
A_4	10,8	10,9	11,6	11,8
A_{4b}	10,7	10,8	11,5	11,8

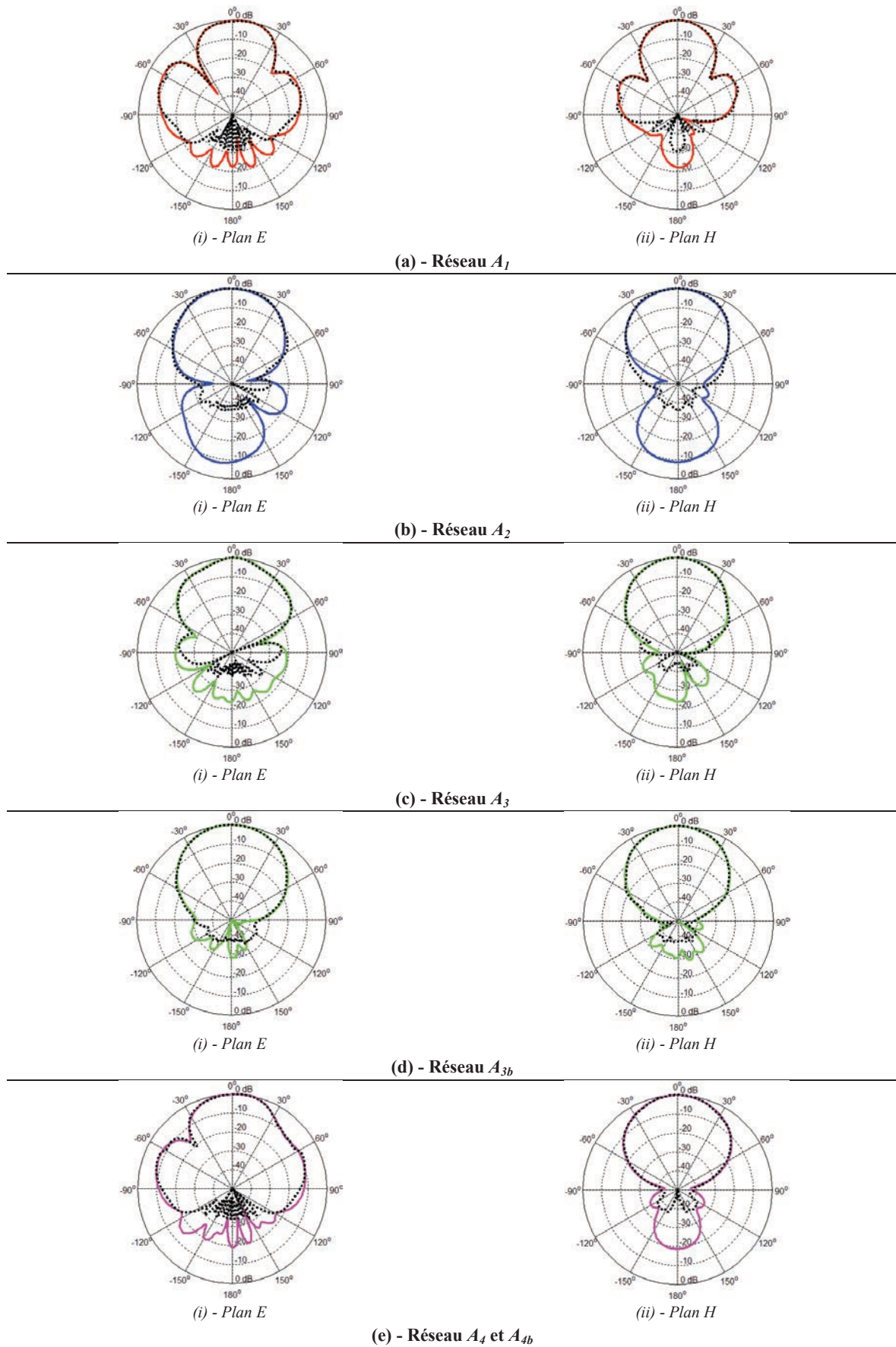


Figure D.2 - Diagrammes de rayonnement polaires des réseaux d'antennes simulés à 60 GHz dans (i) le plan E et (ii) le plan H. (—) En espace libre et (···) en présence du fantôme équivalent.

Annexe D : Méthode de résolution d'une équation différentielle du second ordre inhomogène

L'équation de transfert de chaleur en régime établi est une équation différentielle du second ordre de type

$$a \cdot y''(z) = b. \quad (\text{E.1})$$

La solution de ce type d'équation est donnée par la somme de la solution de l'équation homogène y_h , c'est-à-dire lorsque $b = 0$ et de la solution particulière y_p lorsque $b \neq 0$

$$v(z) = y_h(z) + y_p(z). \quad (\text{E.2})$$

▪ **Solution homogène y_h**

Dans le cas de l'équation homogène $\frac{d^2 y_h}{dz^2} = 0$, la solution candidate est de la forme

$$y(z) = \exp(m \cdot z), \quad (\text{E.3})$$

où l'équation caractéristique associée est égale

$$m^2 = 0 \quad (\text{E.4})$$

avec m une racine double de l'équation caractéristique égale à 0, la forme de la solution homogène est donc la suivante

$$y_h(z) = C_1 + C_2 \cdot z, \quad (\text{E.5})$$

où C_1 et C_2 sont des constantes.

▪ **Solution particulière y_p**

Dans le cas de l'équation particulière $\frac{d^2 y_p}{dz^2} = -q(z)$, la solution candidate est de la forme

$$y_p(z) = C_3 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{\delta}\right). \quad (\text{E.6})$$

En substituant, l'expression de la solution candidate dans l'équation particulière on obtient

$$\frac{4 \cdot C_3}{\delta^2} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{\delta}\right) = q(z), \quad (\text{E.7})$$

avec pour rappel

$$q(z) = q_0 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{\delta}\right), \quad (\text{E.8})$$

permettant d'établir l'expression suivante pour le coefficient C_3

$$C_3 = \frac{q_0 \cdot \delta^2}{4}. \quad (\text{E.9})$$

La forme de la solution particulière est donc

$$y_p(z) = \frac{q_0 \cdot \delta^2}{4} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{\delta}\right). \quad (\text{E.10})$$

▪ **Forme générale de la solution de l'équation de transfert en régime établi**

En sommant les formes des solutions trouvées pour y_h et y_p , on obtient la forme générale suivante pour l'équation de transfert de chaleur en régime établi

$$v(z) = C_1 + C_2 \cdot z + C_3 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{\delta}\right). \quad (\text{E.11})$$

Annexe E : Système de résolution permettant d'établir l'expression de la solution $v(z)$ spécifique au modèle

La forme générale de l'équation de transfert de chaleur en régime établi $v(z)$ est donnée par l'expression analytique suivante

$$v(z) = C_1 + C_2 \cdot z + C_3 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{\delta}\right) \quad (\text{F.1})$$

où C_1 , C_2 et C_3 sont des coefficients constants.

L'expression du coefficient C_3 est obtenue en résolvant la solution particulière de l'équation de transfert de chaleur. Pour les coefficients C_1 et C_2 , il est possible de déterminer leurs expressions spécifiques aux cas du modèle thermique du fantôme à épaisseur finie en considérant les conditions limites de l'équation en régime établi, dans lesquelles $v(z)$ et $dv(z)/dz$ sont remplacées par leurs expressions analytiques, afin d'établir un système d'équation à deux inconnues C_1 et C_2 .

▪ **Première étape : dériver $v(z)$**

La première étape consiste à dériver la solution $v(z)$ d'écrite par l'équation (F.1)

$$\frac{dv(z)}{dz} = C_2 - \frac{2 \cdot C_3}{\delta} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot z}{\delta}\right). \quad (\text{F.2})$$

▪ **Deuxième étape : substituer $v(z)$ et $dv(z)/dz$ dans les expressions des conditions limites**

Les conditions limites de l'équation de transfert en régime établi sont les suivantes

$$\begin{cases} \frac{dv(0)}{dz} = \alpha_1 \cdot v(0) \\ \frac{dv(L)}{dz} = -\alpha_2 \cdot v(e_p) \end{cases} \quad (\text{F.3})$$

dans lesquelles on remplace $v(z)$ et $dv(z)/dz$ par les expressions analytiques (F.1) et (F.2)

$$\begin{cases} C_2 - \frac{2 \cdot C_3}{\delta} = \alpha_1 \cdot (C_1 + C_3) \\ C_2 - \frac{2 \cdot C_3}{\delta} \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot L}{\delta}\right) = -\alpha_2 \cdot \left(C_1 + C_2 \cdot L + C_3 \cdot \exp\left(-\frac{2 \cdot L}{\delta}\right)\right) \end{cases} \quad (\text{F.4})$$

Vu que $q_0 = 0$ pour $z > 0$, la constante C_3 est nulle dans le cas où $z = L$

$$\begin{cases} C_2 - \frac{2 \cdot C_3}{\delta} = \alpha_1 \cdot (C_1 + C_3) \\ C_2 = -\alpha_2 \cdot (C_1 + C_2 \cdot L). \end{cases} \quad (\text{F.5})$$

A partir du système (F.5) il est alors possible d'établir que

$$\begin{cases} C_3 = \frac{q_0 \cdot \delta^2}{4} \\ C_2 = \frac{\frac{2}{\delta} + \alpha_1}{1 + \alpha_1 \cdot \left(\frac{1}{\alpha_2} + L\right)} \cdot C_3 \\ C_1 = -\frac{1 + \alpha_2 \cdot L}{\alpha_2} \cdot C_2 \end{cases} \quad (\text{F.6})$$

Annexe F : Expressions analytiques des solutions $\Gamma(t)$ et $Z(z)$

La solution de l'équation de transfert de chaleur homogène en régime transitoire est établie en utilisant une méthode de décomposition de variables, avec la décomposition suivante

$$w(z, t) = Z(z) \cdot \Gamma(t). \quad (G.1)$$

Cette décomposition permet de réécrire l'équation de transfert de chaleur homogène en régime transitoire de la manière suivante

$$\frac{\rho \cdot c}{k} \cdot Z(z) \cdot \frac{d\Gamma(t)}{dt} = \Gamma(t) \cdot \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} \quad (G.2)$$

et de la réorganiser comme

$$\frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{1}{\Gamma(t)} \cdot \frac{d\Gamma(t)}{dt} = \frac{1}{Z(z)} \cdot \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = -\lambda^2. \quad (G.3)$$

Pour résoudre cette équation, il faut traiter et résoudre séparément chaque membre de (G.3) afin de déterminer les expressions respectives de $\Gamma(t)$ et de $Z(z)$.

▪ **Solution relative à l'espace $Z(z)$**

Pour résoudre $Z(z)$ on considère l'équation suivante

$$\frac{1}{Z(z)} \cdot \frac{d^2 Z(z)}{dz^2} = -\lambda^2 \quad (G.4)$$

laquelle peut être réécrite de la manière suivante

$$\frac{d^2 Z(z)}{dz^2} + \lambda^2 \cdot Z(z) = 0. \quad (G.5)$$

L'équation (G.5) est une équation différentielle du second ordre de la forme $a \cdot y'' + c \cdot y = 0$, qui a une solution candidate de la forme $y(x) = \exp(m \cdot x)$, à partir de laquelle on obtient l'équation caractéristique $m^2 + \lambda^2 = 0$ qui a deux racines conjuguées complexes qui sont $\begin{cases} i \cdot \lambda \\ -i \cdot \lambda \end{cases}$.

La solution générale de l'équation (G.5) est donc de la forme

$$Z(z) = C_1 \cdot \sin(\lambda \cdot z) + C_2 \cdot \cos(\lambda \cdot z). \quad (G.6)$$

En dérivant puis en substituant $Z(z)$ et $dZ(z)/dz$ dans la condition limite de l'équation en $z = 0$ on obtient la solution simplifiée suivante

$$Z(z) = (\alpha_1 \cdot \sin(\lambda \cdot z) + \lambda \cdot \cos(\lambda \cdot z)) \cdot C_2. \quad (G.7)$$

▪ **Solution relative au temps $\Gamma(t)$**

Pour résoudre $\Gamma(t)$ on considère l'équation suivante

$$\frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{1}{\Gamma(t)} \cdot \frac{d\Gamma(t)}{dt} = -\lambda^2, \quad (\text{G.8})$$

laquelle peut être réécrite de la manière suivante

$$\frac{\rho \cdot c}{k} \cdot \frac{d\Gamma(t)}{dt} + \lambda^2 \cdot \Gamma(t) = 0. \quad (\text{G.9})$$

L'équation (G.9) est une équation différentielle du premier ordre de type $a \cdot y' + b \cdot y = 0$, dont la forme de la solution $y(t)$ et donc de $\Gamma(t)$ est donnée par la méthode suivante

$$\frac{\rho \cdot c}{k} \cdot y' + \lambda^2 \cdot y = 0 \quad (\text{G.10})$$

$$\frac{y'}{y} = -\lambda^2 \cdot \frac{k}{\rho \cdot c}. \quad (\text{G.11})$$

Par intégration on obtient

$$\ln(y) = -\lambda^2 \cdot \frac{k}{\rho \cdot c} \cdot t + cst \quad (\text{G.12})$$

$$y = \exp\left(-\lambda^2 \cdot \frac{k}{\rho \cdot c} \cdot t + cst\right) \quad (\text{G.13})$$

soit

$$\Gamma(t) = C_3 \cdot \exp\left(-\lambda^2 \cdot \frac{k}{\rho \cdot c} \cdot t\right) \quad (\text{G.14})$$

Résumé

Récemment la bande autour de 60 GHz a été mise en avant pour le développement des réseaux de communication sans fil centrés sur le corps humain. L'intérêt de cette bande pour les applications BAN (Body Area Network) s'explique par les avantages clefs qu'elle procure par rapport aux bandes de fréquence plus basses (possibilité de débits de données supérieurs à 7 Gbit/s, réduction des interférences avec les réseaux voisins, compacité des dispositifs, etc.).

Le nombre d'applications dédiées aux BAN à 60 GHz est amené à croître dans les années à venir avec le déploiement de la 5^{ème} génération de réseaux de télécommunications mobiles. Afin d'éviter des expositions en champ proche localement trop importantes pour les utilisateurs, il est nécessaire de se pencher sur les problématiques d'évaluation, de quantification et de réduction du couplage corps/antenne à 60 GHz. Pour cela, les travaux de thèse ont porté selon trois axes : le premier consiste à mettre en évidence et à quantifier l'impact de certains choix de conception en matière d'antennes sur le couplage avec le corps humain ; le second porte sur les outils et les méthodes utilisés pour estimer l'impact thermique d'une exposition électromagnétique à 60 GHz sur un fantôme équivalent de la peau ; enfin le troisième axe concerne l'analyse quantitative à la fois électromagnétique et thermique du couplage corps/antennes en bande millimétrique.

Mots clés : Couplage corps/antennes, bande millimétrique, 60 GHz, BAN, fantômes, dosimétrie, débit d'absorption spécifique (DAS), modèle thermique, transferts de chaleur, température

Abstract

The 60-GHz frequency band has been identified as very attractive for body-centric wireless communications. This band has several key advantages compared to lower frequency bands such as high data rates (above 7 Gbit/s), low interference with neighboring wireless networks, and compact size of antennas and electronic components.

With the development of the future 5th generation of mobile networks integrating the millimeter-wave band, the number of BAN (Body Area Network) applications at 60 GHz is expected to increase. To avoid significant local exposures of users under near-field conditions, this PhD research project deals with the evaluation, quantification and reduction of coupling between the human body and antennas. Research directions are threefold: (1) study of antenna design and feeding effects on the coupling between human body and antennas; (2) implementation of tools and methods to assess thermal effects due to 60 GHz exposure on a skin-equivalent phantom; and (3) an electromagnetic and thermal quantitative analysis of interactions between human body and BAN antennas at 60 GHz.

Keywords: Antenna/human body interactions, millimeter-wave band, 60 GHz, phantoms, dosimetry, specific absorption rate (SAR), thermal model, heating.